الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي



الفيزياء

للسنة التحضيرية للكليات الطبية

المؤلفون

د. سهام الطرابيشي
د. بيداء الأشقر
د. مصطفى صائم الدهر

المدققون العلميون

د. فوزي عوض: أستاذ في قسم الفيزياء - جامعة دمشق
د. سهام الطرابيشي: أستاذ في قسم الفيزياء - جامعة دمشق

المدقق اللغوي

د. محمد القاسم

٢٠١٥ - ٢٠١٦ م
١٤٣٦ - ١٤٣٧ هـ

الفِهْرِس

المقدمة

تقوم العضلة القلبية في الجسم الحي بتطبيق موجة ميكانيكية على الدم، يعدُّ كل من ضغطها وتواترها دليلاً سريرياً على صحة تلك العضلة.

ويبث الجسم الحي تلقائياً، إشعاعاً حرارياً ينشأ عن العمليات الاستقلابية التي تجري في كل خلية من خلايا الجسم، يطلق عليه الإشعاع تحت الأحمر، كما يبث إشعاعاً ينفذ من خلال المواد كلها عدا الماء والمعادن هو إشعاع التيراهرتز، وينشأ عن الحركات الاهتزازية والدورانية التي تطرأ على الجزيئات التي تتكون منها النسج؛ ينتمي الإشعاعان المذكوران إلى طيف الإشعاعات الكهرطيسية، ويقعان في جهة التواترات (الترددات) المنخفضة منه.

ويبث الجسم أيضاً أمواجاً ميكانيكية تنشأ عن الوحدات المحركة في الألياف العضلية تنتمي إلى طيف الأمواج الصوتية، وتقع في مجال التواترات المنخفضة منه، فلا تدركها الأذن، ويطلق عليها اسم الأمواج تحت الصوتية.

يمكن عدُّ كلاً من هذين النوعين من الأمواج التي تصدر من الجسم وسيلة سريرية للحكم على صحته.

وتقوم أعضاء الجسم الحي كالدماغ والقلب والعضلات بنشاطات كهربائية تنشأ عنها حقول كهربائية وأخرى مغنطيسية، يمكن الآن التقاطها ومعالجتها حاسوبياً، فتعطي أدلة سريرية مهمة على صحة تلك الأعضاء.

ويطل الإنسان على العالم الخارجي من خلال أجهزة الإبصار والاستماع والتصويت لديه، فيستقبل الأول، ويترجم الرسائل المحمولة بأمواج الضوء المرئي الذي يتوسط طيف الإشعاعات الكهرطيسية، ويستقبل الثاني، ويترجم الرسائل المحمولة بالأمواج المسموعة التي يصدرها جهاز التصويت وتتوسط طيف الأمواج الصوتية. هذا وإن استمرار اتصال الإنسان بالمحيط الخارجي مرهون بسلامة هذه الأجهزة.

إن الأشعة السينية، التي تقع في مجال التواترات العالية من طيف الإشعاعات الكهرطيسية، وبعضَ نواتج التفكك النووي كالأشعة الغاماوية _ توءم الأشعة السينية في طيف الإشعاعات الكهرطيسية _ وكلاً من الإلكترونات والبوزترونات، تتصف جميعاً بقدرتها على سبر الجسم البشري وتفحّصه وإتاحة الفرصة لرؤية ما بداخله دون حاجة إلى بضعه (فَتْحِهِ). وهي تستخدم اليوم في استكشافه وتعرُّف الظواهر المرضية فيه. إذ تزودنا الأشعة السينية من خلال تقنيتي التصوير الشعاعي والتصوير المقطعي (الطبقي) المحوري بصور تشريحية، وهي من أهم ما يمكن اللجوء إليه للكشف عن الكسور. كما تزودنا

نواتج التفكك الإشعاعي عن طريق التصوير الومضاني أو التصوير المقطعي الإصداري بمدى انتشار مرض خبيث في الجسم.

ويتمتع الجسم كذلك بخصائص مغنطيسية نووية، تعود إلى تمتع نوى بعض مكوّنات الجسم البشري بعزم مغنطيسي غير معدوم كالهدروجين - المكوّن الرئيسي للعضوية الحية- والفوسفور والصوديوم، فيمكننا لدى تطبيق حقل مغنطيسي وموجة راديوية (تنتمي إلى طيف الإشعاعات الكهرطيسية) من الحصول على صورة تشريحية للعضوية أو وظيفية وتزويد الطبيب بأهم الدلائل الصحية عن طريق التجاوب (الرنين) المغنطيسي النووي.

فلو كانت عين الإنسان تدرك الرسائل المحمولة بالأشعة تحت الحمراء أو السينية أو الغاماوية على النحو الذي تدرك به الأشعة المرئية...

ولو كانت أذنه تدرك الرسائل المحمولة بالأمواج تحت الصوتية أو بالأمواج فوق الصوتية على النحو الذي تدرك بها الأمواج المسموعة...

ولو كان جهاز التصويت لديه يصدر غير الأمواج التي يصدرها...

ولو كانت دماغه تدرك الحقول الكهربائية أو تغيرات الحقول المغنطيسية على نحو ما تقوم به الدارات الكهربائية...

ولو كانت وظائف الاتصال لديه أكثر اتساعاً مما هي عليه لأمكن تعرف الكثير من دلائل الصحة السريرية، ولأمكن رؤية داخل جسم الإنسان وقراءة أفكاره دون حاجة إلى مكشاف لهذه الأشعة أو تلك، أو لهذا الحقل أو ذاك، وما كان ليتأخر استكشاف الجسم البشري قروناً طويلة.

ولحسن الحظ فإن حاستي البصر والسمع لدى الإنسان كليلتان. ولو لم تكونا كذلك، ما قرّت له عين ولا هدأت له أذن وبجواره مخلوقات حية تبث على الدوام الإشعاعات الحرارية والأمواج تحت الصوتية، ولعافت نفسه الأطعمة والأشربة التي يراها تعج بالكائنات المكروية (الدقيقة).

أخيراً، إن التحكم في شدة الأمواج الكهرطيسية أو الميكانيكية يجعلها مفيدة في غير التشخيص، فتستخدم الأولى في الجراحة (الليزر) وتستخدم الثانية في تفتيت الحصى.

إن الأمور المذكورة أعلاه تهمُّ طلاب السنة التحضيرية للكليات الطبية في مراحل دراستهم كلها بقدر ما تهم خرّيجيها المستقبليين. ولهذا عالجناها في هذا الكتاب، الذي سيدرس لطلاب السنة التحضيرية

للكليات الطبيـة فـي جامعـات الجمهوريـة العربيـة السـورية، بعمـق ووضـوح مـن الناحيـة الفيزيائيـة دون التعرض إلى التفصيلات الرياضية.

يتضح من خلال هذه التطبيقات أنه يمكن ردها إجمالاً إلى التأثير المتبادل بين طيفي الإشعاعات الكهرطيسية والأمواج الميكانيكية من جهة والجسم البشري من جهة أخرى، وإلى الظواهر الكهربائية والمغنطيسية التي تنجم عن الفاعليات الكهربائية لمختلف أعضاء الجسم وأخيراً إلى الخواص المغنطيسية النووية لمكونات الجسم. ولهذا رأينا أن تتناول الفصول الأحد عشر الأولى الإشعاعات (الأمواج) الكهرطيسية وتطبيقاتها؛ يحتل الليزر وتطبيقاته الفصول الثلاثة الأخيرة منها؛ في حين يختص الفصلان الثاني عشر والثالث عشر بما يتعلق بالطب النووي من بنية النواة والنكليدات المشعة وتطبيقاتهما. أما الفصول السبعة التالية من الفصل الرابع عشر إلى الفصل المُتِمّ العشرين فتعالج الأمواج الميكانيكية، وتعالج الفصول الثلاثة الأخيرة ما يتعلق بالتطبيقات الكهربائية والمغنطيسية.

أما الفصول العشرة الأوائل فخصصت للتعرف على طبيعة الإشعاعات الكهرطيسية وخصائصها وآلية توليدها وآثارها في الحيوية كي نستوعب تطبيقاتها في العمق.

إذ تناول الفصل الأول الطبيعة المشتركة للأمواج الكهرطيسية مهما كان نوعها؛ وكان أبرز ما فيه الحديث عن المثنوية الموجية الجسيمية للإشعاعات الكهرطيسية، وعن مفعول كومتون الذي يظهر الطبيعة الجسيمية للإشعاعات الكهرطيسية واستثماره في الكشف عن هشاشة العظام لدى المتقدمين في العمر. تناول الفصل أيضاً المثنوية الجسيمية الموجية للجسيمات المادية والمجاهر الإلكترونية التي اعتمدت على الطبيعة الموجية للجسيمات المادية، فأحدثت ثورة في العلوم الحيوية.

استعرض الفصل الثاني النماذج الذرية المختلفة بدءاً من نموذج طومسون ومروراً بنموذجي رذرفورد وبور ثم النموذج الكموميّ لذرّة الهدروجين والتوابع الموجيّة لذرّة الهدروجين والدلالة الفيزيائيّة للأعداد الكموميّة التي تُعرِّف حالة الذرّة، بهدف التعرف على آلية توليد الإشعاعات الكهرطيسية وإصدارها على المستوى الذري والجزيئي ، وقد اختيرت ذرة الهدروجين مثالاً توضيحياً نظراً لبساطتها فهي أبسط الذرات. يتناول هذا الفصل أيضاً دراسة الخصائص المغنطيسيّة الإلكترونيّة، وذلك للدور المهمّ الذي تؤدّيه هذه الخصائص في سلوك الذرّة، بالإضافة إلى الخصائص النوويّة المناظرة لها، في استكشاف الجسم البشري باللجوء إلى واحدة من أحدث تقنيات الاستكشاف التي تعرف بالرنين (التجاوب) المغنطيسي.

يمكن أن تعمم النظرية الكمومية لتشمل الذرات الأخرى ليس هذا فقط، وإنما مجموعة منها كالجزيئات والبلورات فيقال إنه يمكن تمثيل سلوك الجزيئات أو البلورات بسلوك تابع موجي للجملة يحقق معادلة

شرودنغر للجملة. وبسبب صعوبة إيجاد حل لها، يلجأ إلى تقريبات مناسبة كما في دراستنا للجزيئات ثنائية الذرة في فصل إشعاعات التيراهرتز.

وانصرف الفصل الثالث إلى دراسة الضوء المرئي من طيف الإشعاعات الكهرطيسية؛ لأنه أول مجال تم التعرف عليه بجهاز الإبصار الذي يطل الإنسان من خلاله على العالم الخارجي، وقد تم تناول تطبيقات متعددة تتضمن المجال المرئي بالإضافة إلى أجزاء من المجالين اللذين يحيطان به، وهما مجالا الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء، وقد كانت المطيافية الضوئية من أهم هذه التطبيقات. كما سيتضمن تطور معرفة القوانين التي يخضع لها انتشار الضوء تاريخياً بدءاً مما يسمى الضوء الهندسي والضوء الفيزيائي أو الموجي وانتهاء بالضوء الكمومي أو الفوتونيات. وقد رافقت هذه القوانين معرفتنا لطبيعة الضوء.

وفي الفصل الرابع نستعرض الأشعة فوق البنفسجية؛ وهي التي تقع في جهة التواترات الأعلى من المجال المرئي. وهي الأشعة التي يمكن التعرف عليها من غير أن نراها، ومن أجلها قال الأقدمون: إن البيت الذي تدخله الشمس لا يدخله طبيب. أهم ما نركز عليه في هذا الفصل تأثيراتها في الكائنات الحية.

وفي الفصل الخامس نتناول الأشعة السينية التي تعقب الأشعة فوق البنفسجية من حيث ارتفاع التواتر. وهي الأشعة التي حققت حلم الإنسان القديم في رؤية داخل الجسم من دون بضعه، من خلال التصوير الشعاعي والتنظير الشعاعي والتصوير الطبقي المحوري.

ومن الجهة الأخرى للضوء المرئي يأتي الفصل السادس والإشعاع تحت الأحمر، الذي يجري امتصاصه عادة بما يدعى الأنماط الدورانية والاهتزازية في جزيئات الطور الغازي، وبالحركات الجزيئية في السوائل والفونونات المقابلة في الأجسام الصلبة. تأتي أهمية هذا الفصل من حيث إمكانية التعرف على توزع درجات الحرارة في العضوية، ومن ثم على توزع شدة العمليات الاستقلابية التي تنبئ عن الحالة السريرية للجسم من خلال قياس التوزع المكاني للأطوال الموجية المميِّزة للإشعاع الصادر من الجسم. كما يمكننا أيضاً، من خلال دراسة جسم الإنسان كجسم أسود فهم الدور الذي يؤديه ليزر الأشعة تحت الحمراء في الجراحة.

ندرس في الفصل السابع أمواج التيراهرتز التي تصدر من الجمادات والأحياء على السواء، وتنشأ من الحركات الاهتزازية والدورانية للجزيئات التي تتكون منها النسج في حالة الأحياء، وقد فتحت هذه الأمواج آفاقاً جديدة في مجال الطب وأغلقت فجوة تقنية بين المجالات عالية التواتر ومنخفضته بعد أن أمكن توليدها والكشف عنها بسهولة، فاستعملت في الكشف عن النخور السنية في مراحلها المبكرة غير المرئية أو في تشخيص الإصابة بالسرطان في مرحلة مبكرة وتحديد موقعها.

وفـي الفصـل الثـامن نتنـاول الأمـواج المكرويـة ودورهـا فـي المعالجـة الحراريـة وتطبيقهـا فـي العصـا الكهربائية وتسخين الأطعمة. نتناول أيضاً في هذا الفصل الدور الذي تؤديه هذه الأمواج، بالإضافة إلى الأمواج الأخرى التي تعرف بانخفاض طاقات فوتوناتها، من خلال عملها الجماعي، في تسخين الأوساط التي تمر بها. ونميزها من فوتونات الأشعة فوق البنفسجية والسينية وغاما التي يمكن للفوتون الواحد منها تأيين الجزيئات والذرات.

ونفصّل في الفصل التاسع الحديث عن أنواع الليزرات وخصائصها. كما نفصّل في الفصل العاشر آثار النسج في انتشار الليزر كالانعكاس والانتثار والنفوذ وغيرها بالإضافة إلى الحديث عن التقانة النانوية التي تترافق مع الليزر نذكر من تطبيقاتها التحليل الجرثومي بالاعتماد على النقاط الكمومية والليزر.

وفي الفصل الحادي عشر نتحدث عن آثار الليزر في النسيج الحي نتيجة للامتصاص كالآثار الحرارية والفوتوكيميائية والاستئصال الضوئي والتمزق الضوئي ...إلخ.

أما في الفصل الثاني عشر فقد تناولنا بنية النواة واستقرارها وأهمية نواتج التفكك الإشعاعي في الطب النووي، بالإضـافة إلـى دراسـة الخصـائص المغنطيسية للنواة ليتسنى لنـا التعرف علـى مكونـات الجسم البشري التي يمكن الاعتماد عليها في الحصول على صور تشريحية للجسم بتصوير التجاوب المغنطيسي النووي والمكونات التي تؤدي وظيفة معينة فيه.

وقد أفردنا الفصل الثالث عشر لطرائق التصوير والمعالجة المتبعة في الطب النووي.

أما في الفصل الرابع عشر فنبدأ بتناول حالات المادة وخصائصها الميكانيكية فنستعرض خصائص المرونـة للمادة ليصار إلى تطبيقها في الفصل العشرين الذي يتضمن دراسة آليات الكشف عن مرونـة الجسم البشري. كما نتناول ميكانيك السوائل لما لـه من أهمية كبيرة في الحيوية، ولاسيّما في الدورة الدموية التي تمثّل حركة نقل بالحمْل convection للدم في الأوعية الدموية، نتيجة الضغط الذي تطبقه العضلة القلبية على الدم.

ندرس في الفصل الخامس عشر الحركات الاهتزازية والطاقات التي تحملها لمناقشة الظواهر الموجية المرتبطة بانتشار كل من الأمواج الصوتية الطولانية وأمواج القصّ العرضانية.

ونتنـاول فـي الفصـل السـادس عشـر الصـوت والخصـائص الفيزيولوجيـة للصـوت وجهـازي الاسـتماع والتصويت لدى الإنسان، كما نتناول آلية توليد الأمواج تحت الصوتية.

وفي الفصل السابع عشر نتحدث عن طريقة التصوير بالصدى التي تدعى الإيكوغرافي والتي تستخدم في تصوير الجنين والمرأة الحامل ...إلخ ، والدور الذي يمكن أن تؤديه الأمواج فوق الصوتية في المعالجة الفيزيائية.

يتناول الفصل الثامن عشر دراسة لمفعول دوبلر أو انزياح دوبلر الذي يستخدم، بالاعتماد على الأمواج فوق الصوتية، في رصد حركة كل من الجنين وصمامات العضلة القلبية لدى استخدامها بالشدات المأمونة.

يتناول الفصل التاسع عشر مفتت الحصى والأمواج التي يمكن استخدامها في تفتيت أنواع الحصى ولاسيّما الأمواج فوق الصوتية التي أصبحت، بشدة وتقنية مناسبتين، تستخدم في تفتيت الحصى. ومع ابتكار عدسات صوتية من نوع خاص مؤخراً أصبح بالإمكان تشكيل طلقات صوتية تقوم بدور جراحي.

يتناول الفصل الأخير من الأمواج الميكانيكية دراسة خصائص مرونة النسج الحيوية، إذْ يمكن للأمواج فوق الصوتية الموسومة بنبضة ميكانيكية قصيّة أن تزوّد الطبيب بإصبع جسية افتراضية لتشخيص الكتل والأورام في النسج.

يتناول الفصل الحادي والعشرون دراسة الخصائص المغنطيسية التي يعتمد عليها الفصلان التاليان. إذ يتناول الفصل الثاني والعشرون دراسة ظاهرة التجاوب المغنطيسي النووي، والانزياح الكيميائي الذي يشكل الأساس الذي يعتمد عليه تحليل المستقلبات الحيوية؛ كما يتناول الفصل طرائق تصوير مختلفة تشريحية ووظيفية.

وأخيراً يتناول الفصل الثالث والعشرون دراسة للحقول المغنطيسية الصادرة من باحات الدماغ المختلفة أثناء تعرض الفرد لتنبيه حسي معين أو أثناء قيامه بمهمة استعرافية معينة بالاعتماد على أدوات قياس دقيقة للحقول المغنطيسية الضعيفة.

كان لابد من إضافة فصلي بنية الذرة والبنية النووية للتذكير ولكن من وجهة نظر كمومية بحتة، دون الغوص بالرياضيات اللازمة لميكانيك الكم، لفهم الأطياف عموماً: إصدارها وامتصاصها، وكيف ساهمت في نشأة ميكانيك الكم. كذلك يمكن أن يساعدا في فهم ظواهر جديدة وتطبيقاتها مثل التجاوب المغنطيسي النووي واستعمالاته الواسعة في العلوم.

وليس يفوتنا في تمام هذه المقدمة أن نتقدم بأخلص الشكر إلى زملائنا في جامعات حلب وتشرين ودمشق الذين تفضلّوا بالإسهام في وضع مفردات هذا الكتاب ولبناته الأولى بناء على طلب وزارة التعليم العالي، ولا سيّما الدكتور محمد أمين البيك من جامعة حلب الذي تفضل مشكوراً بمراجعة بعض فصول الكتاب

والدكتور غسان ناشد من جامعة حلب، وكل من الدكتور محمد الحلبي والدكتورة سلامة أبو الشملات من جامعة تشرين وكل من الدكتور محمود الغفري والدكتور فادي قمر من جامعة دمشق.

وكذا نشكر الأستاذة الدكتورة هند داود نائب رئيس جامعة دمشق للشؤون العلمية التي حرصت على رعايتها اجتماعات وضع مفردات هذا المقرر، وعهدت إلى جامعة دمشق بمهمة تأليف الكتاب ليسهل التداول بين مؤلفيه، ليخرج الكتاب بكل فصوله بماء واحد ونسق متشابه.

ومن تمام الوفاء أن نشكر السادة الأساتيذ في مختلف كليات جامعة دمشق وأقسامها ومشافيها الذين بادروا إلى إجابة ما استفتيناهم فيه، وقدموا الرأي الناضج والخبرة العميقة بسخاء وغبطة وهم د. سامح عيسى في العينية ود. بيان السيد في التشريح ود. هناء مسوكر في الجلدية وطبيبي الأسنان رامي طمزوق وفادي الخشروم.

وكذلك نشكر القرّاء المستقلين الذين رفدونا بالتغذية الراجعة، وعينان خير من عين وإن العصا قرعت لذي الحلم. ونخص منهم محمد مروان الراعي المعيد في قسم الفيزياء بجامعة دمشق والدكتور أحمد حمزة شندي من كلية الطب.

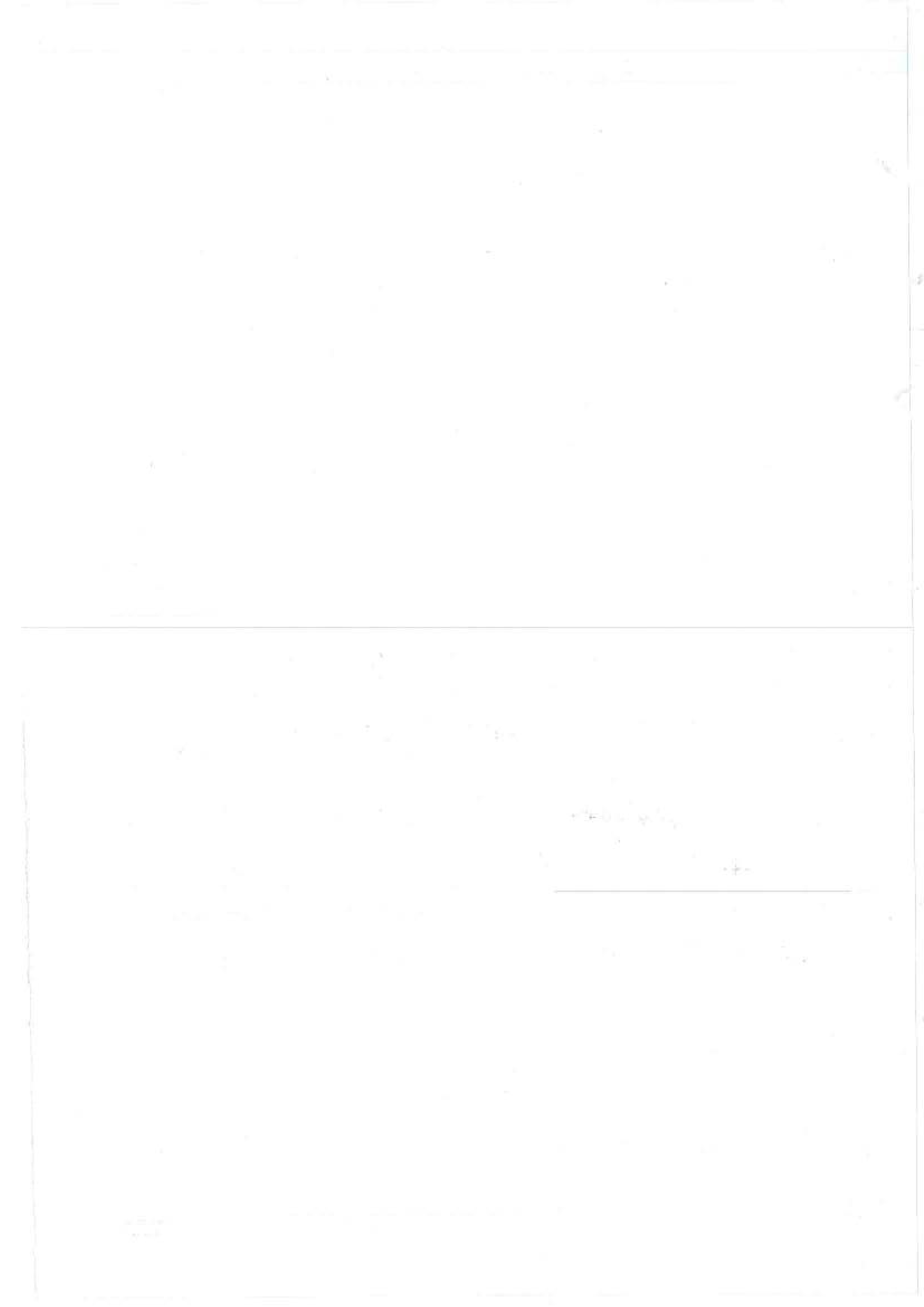
وإذا كان لا يراد بالشكر توفيةُ حقٍ أو قضاء دين فإنا نقدم أخلص الشكر وأزكاه إلى اللجنة العلمية التي تولت مراجعة الكتاب وإعادة النظر فيه مرة بعد مرة، الأستاذة الدكتورة سهام محمد نظمي الطرابيشي والأستاذ الدكتور فوزي غالب عوض الذي أمحض الكتاب ذَوْبَ نفسه، وأَرْجَعَ البَصَرَ فيه كرَّتَيْن حتى استوى على سوقه:

شَكَرْتُكَ إنَّ الشُّكْرَ حَبْلٌ من التقى   وما كلُّ مَنْ أَوْلَيْتَه نعمةً يَقْضي

وكذا نشكر الأخ الدكتور محمَّد عبد الله قاسم الذي تولّى تدقيق الكتاب تدقيقاً لغوياً، ونُكْبِرُ حِرْصَه على الكتاب وغَيْرَتَه على إنجازه على نحوٍ علميٍّ رصين.

نأمل أن يجد أبناؤنا الطلبة أطباء المستقبل في هذا الكتاب ذخيرةً معرفيةً وزاداً ثرّاً يُغْني عقولَهم ويُثْري معارفَهم.

المؤلفون



الفصل الأول

مبادئ الفيزياء الحديثة

Modern Physics Principles

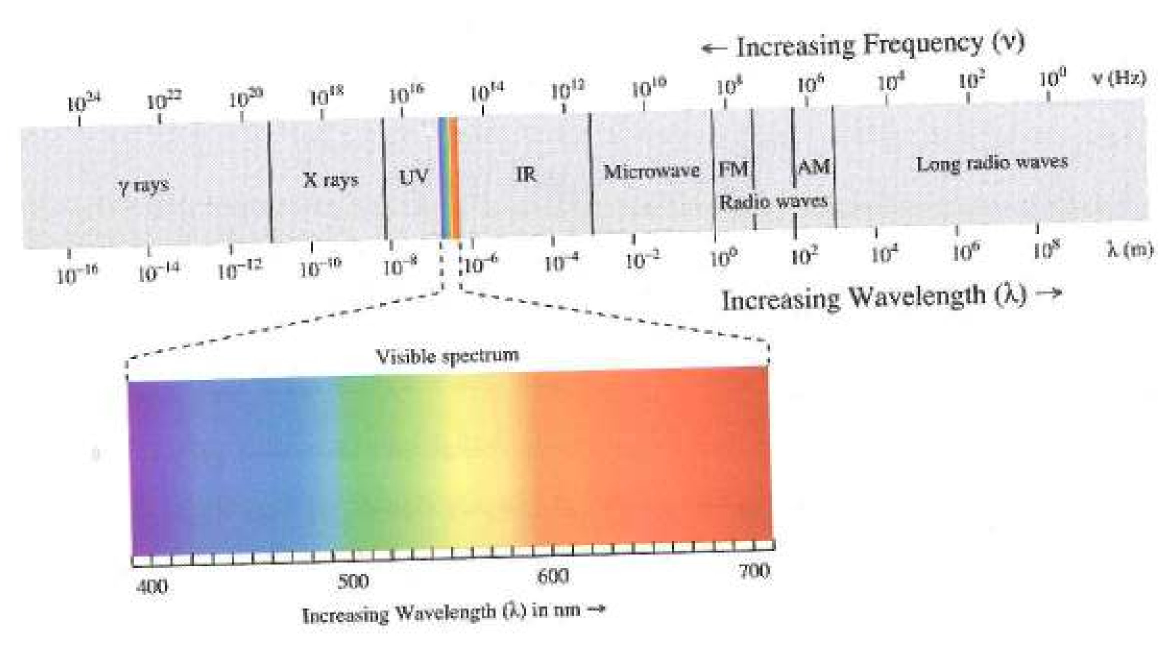
نرى من استعراضنا لتطبيقات الإشعاعات الكهرطيسية أنه من الأهمية بمكان أن نتعرف إلى طبيعة هذه الإشعاعات وإلى خصائصها وآلية توليدها وآثارها في الحيوية. نتناول في هذا الفصل طبيعة الأمواج الكهرطيسية المشتركة مهما كان نوعها، ونعرض في الفصل الثاني آلية توليدها وإصدارها على المستوى الذري والجزيئي، ونخص الفصل الثالث بالجزء المرئي من الإشعاعات الكهرطيسية وتطوراته لما له من أهمية في فهمنا لطبيعة هذه الأمواج.

1.1. الطبيعة المثنوية الموجية _ الجسيمية للإشعاعات الكهرطيسية

ثمة موضوعان متميزان يتناولهما أي كتاب في الفيزياء التقليدية وهما الجسيم والموجة، فالجسيم يتمركز في موضع معين في لحظة ما، ويتميز بخصائص معينة كالكتلة والسرعة والطاقة وما إلى ذلك. والموجة تتميز بتواترها وطولها الموجي وتنتشر ممتدة، أي إنها ليست متمركزة في نقطة معينة عند لحظة معينة، كما أن طاقتها موزعة في الفضاء، وليست محصورة الموضع. وتعتبر عملية التصادم إحدى الظواهر المميزة للأجسام في حين تجد أن ظاهرتي التداخل والانعراج تميزان الأمواج.

يمكن تمثيل الإشعاع وفقاً للطبيعة الموجية، بموجة كهرطيسية تنتشر في الخلاء في خط مستقيم وبسرعة $c = 300\ 000\ kms^{-1}$.

بينت تجارب يانغ في التداخل وفرينل في الانعراج في أوائل القرن التاسع عشر أن للأشعة الضوئية خاصية موجية، ثم أثبتت تجارب ماكسويل في عام 1865 الطبيعة الموجية للإشعاع الكهرطيسي عامة، وأن الأمواج الكهرطيسية تصدر عند تسارع جسيمات مشحونة، وأن سرعة انتشارها هي سرعة الضوء نفسها. ويبين الشكل 1.1 طيف الإشعاعات الكهرطيسية وفقاً لتناقص أطوالها الموجية بدءاً من الأمواج الراديوية ذات الطول الموجي الكبير نسبياً، مروراً بأشعة الرادار ثم الأشعة تحت الحمراء ثم الضوء المرئي (الأشعة الضوئية) ثم الأشعة فوق البنفسجية حتى نصل إلى أشعة قصيرة الطول الموجي جداً هي الأشعة السينية وأشعة غاما. ومن ذلك يتبين أن الأشعة الضوئية هي جزء من الإشعاعات الكهرطيسية تختلف عن غيرها في الطول الموجي وفي التواتر.



الشكل1.1. طيف الإشعاعات الكهرطيسية

غير أن بلانك قال إن طاقة الإشعاعات الكهرطيسية مكماة أيضاً لتفسير إشعاع الجسم الأسود وتوزع طاقته على الأطوال الموجية المختلفة، وقد أطلق على كل كم *Quantum* منها اسم الفوتون، ويسلك الفوتون، وفقاً لهذه الفرضية، سلوك الجسيمات المادية عند تفاعله مع إلكترونات المادة، كما افترض بأن كم الطاقة (طاقة الفوتون) E_{min} مقدار يتعلق بتواتر الشحنة المهتزة أي بتواتر f الشعاع الصادر وفقاً للعلاقة

$$E_{min} = hf \qquad (1.1)$$

حيث $h = 6.626 \times 10^{-34} Joul.s$ ثابت بلانك، وتكون طاقة الشحنات المهتزة مضاعفاً صحيحاً للكمية hf

$$E_n = nhf \qquad (1.2)$$

وتسمى هذه الفرضية فرضية بلانك الكمية، وهي تعني أن طاقة الاهتزاز يمكن أن يكون لها إحدى القيم $1hf, 2hf, 3hf, ...$ وهكذا، ولكن لا يوجد اهتزاز طاقته بين هذه القيم، والطاقة ليست كمية مستمرة أو متصلة، بل إنها مكماة أي تتكون فقط من كمات متقطعة، وأصغر كمية لها هي hf.

1.1.1. تفسير آينشتاين للمفعول الكهرضوئي

قدم آينشتاين في عام 1905 تفسيراً للمفعول الكهرضوئي اعتمد فيه على فرضية بلانك، وعلى أن تفاعل الفوتونات مع إلكترونات المادة يشبه التصادم بين الجسيمات، وحصل بهذا التفسير على جائزة نوبل لعام 1921. وإذا كان بلانك قد اقترح أن الامتصاص والإصدار يتم وفق كمات من الطاقة فإن آينشتاين قد أضاف أن الضوء نفسه يمكن اعتباره مؤلفاً من كمات أطلق عليها اسم الفوتونات، وهي تسلك سلوك

جسيمات تتحرك بسرعة الضوء. فإذا كان تواتر الضوء f وطول موجته λ فإن لكل فوتون طاقة مقدارها:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \qquad (1.3)$$

وإذا عبرنا عن الطول الموجي بالأنغستروم $(1A^{\circ} = 10^{-10} m)$ وعن طاقة الفوتون بالإلكترون _ فولط $(1eV = 1.6\times10^{-19} Joul)$ وهما وحدتان أكثر تلاؤماً مع مقادير الفيزياء الذرية تأخذ العلاقة (1.3) الشكل:

$$E(eV) = \frac{12400}{\lambda(A^{\circ})} \qquad (1.3)'$$

وهذا الأمر ينطبق على الإشعاع الكهرطيسي بشكل عام. فإذا كان الإشعاع وحيد اللون فإنه يكون مؤلفاً من كمية من الفوتونات المتساوية الطاقات. وتكون الشدة في هذه الحالة متناسبة مع عدد الفوتونات. أما الإشعاع المستمر الذي يضم أطوالاً موجية مختلفة كالضوء الأبيض مثلاً فيتكون من فوتونات مختلفة الطاقات.

تقدم نظرية الفوتونات تفسيراً واضحاً للمفعول الكهرضوئي. فالإلكترون يمتص فوتوناً كاملاً، فإذا كانت طاقة هذا الفوتون أكبر من طاقة التأين أو مساوية لها فإنها تحرر الإلكترون من المعدن. وبقدر ما يكون تواتر الفوتون أعلى تكون طاقته أكبر ويكون أقدر على تحرير الإلكترون، وإن أصغر قيمة للتواتر كافية لتحرير الإلكترون تمثل التواتر الحرج f_0 وطاقة الفوتون المقابلة تساوي طاقة التأين.

1.1.2. مفعول كومتون

لقد أعطت ظاهرة المفعول الكهرضوئي تأكيداً جديداً للنظرية الجسيمية للإشعاع أي نظرية الفوتونات، الأمر الذي دفع كثيراً من الباحثين إلى إجراء تجارب عديدة كانت إحداها انتشار الأشعة السينية بمفعول كومتون Compton effect، فقد لاحظ كومتون في هذه التجربة أن الأشعة المنتثرة ذات تواتر أخفض قليلاً من تواتر الأشعة الساقطة. وقد فشلت الفيزياء التقليدية الموجية في تفسير هذه الظاهرة، الأمر الذي حدا بـ كومتون إلى استخدام الصورة الجسيمية للإشعاع، والنظر إلى هذه الظاهرة على أنها حالة اصطدام بين فوتونات الأشعة السينية الساقطة وإلكترونات المادة. حيث ينظر إلى الفوتون في هذه الحالة على أنه جسيم يعطى كل من طاقته E واندفاعه p على النحو:

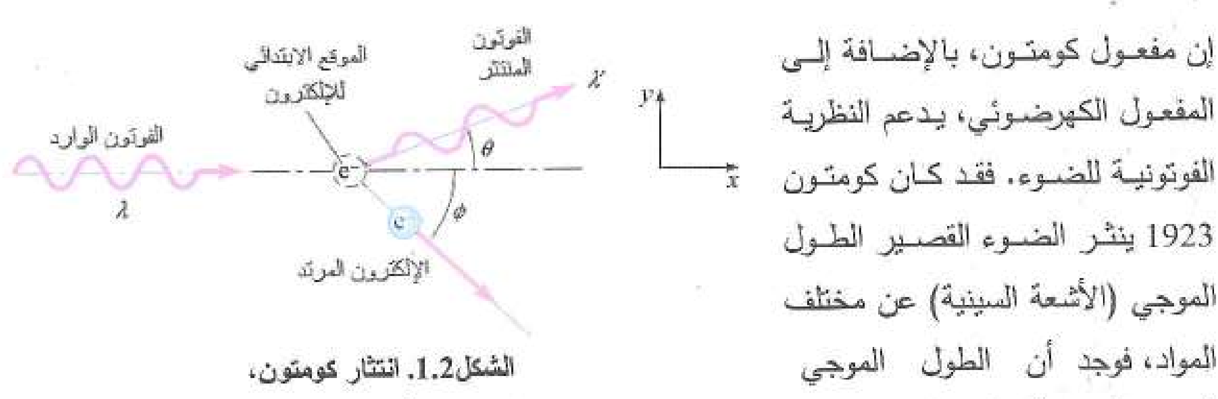
$$p = hf/c = h/\lambda \quad و \quad E = hf = hc/\lambda \qquad (1.4)$$

فالعلاقة الأولى معروفة، بينما نتجت الثانية من العلاقة $p = E/c$ للفوتونات الضوئية. وبما أن الفوتون جسيم فيمكن أن نعبر عن اندفاعه بدلالة كتلته الحركية $p = mc$ وبالتعويض في العلاقة (1.4) فيمكننا التعبير عن كتلته الحركية على النحو:

$$m = h / \lambda c \qquad (1.5)$$

وبتطبيق قوانين انحفاظ الطاقة والاندفاع لجملة الفوتون والإلكترون استطاع كومتون أن يفسر نتائج المعطيات التجريبية.

إن مفعول كومتون، بالإضافة إلى المفعول الكهرضوئي، يدعم النظرية الفوتونية للضوء. فقد كان كومتون 1923 ينثر الضوء القصير الطول الموجي (الأشعة السينية) عن مختلف المواد، فوجد أن الطول الموجي للضوء المنتثر أطول بقليل من الطول الموجي الوارد، ومِن ثَمَّ تواتره أخفض بقليل، مما يدل على فقدان جزء من طاقته. وقد فسر تلك النتيجة بالاعتماد على النظرية الفوتونية على أنه تصادم الفوتونات بإلكترونات المادة (الشكل1.2). وباستخدام معادلة اندفاع الفوتون $p = h / \lambda$، طبق كومتون قانوني انحفاظ الاندفاع والطاقة على التصادم في الشكل1.2 واشتق المعادلة التالية لطول موجة الفوتونات المنتثرة:



الشكل1.2. انتثار كومتون.

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c}(1 - \cos\theta)$$

حيث m_0 الكتلة السكونية للإلكترون. تدعى الكمية $\frac{h}{m_0 c}$ التي لها أبعاد الطول "طول موجة كومتون" Compton wavelength للفوتونات المنتثرة. نرى أن الطول الموجي الذي تم التنبؤ عنه للفوتونات المنتثرة يعتمد على الزاوية θ التي يكشف عندها عن هذه الفوتونات. ولقد كانت نتائج قياسات كومتون منسجمة مع هذه العلاقة. يجدر بالذكر أن النظرية الموجية لا تتنبأ بمثل هذا الانزياح؛ إذ لا بد لموجة كهرطيسية واردة تواترها f أن تجعل الإلكترونات تهتز بالتواتر نفسه f؛ تعيد هذه الإلكترونات إصدار الأمواج الكهرطيسية بالتواتر نفسه، ولا يتغير مع الزاوية θ. ومن ثم فإن مفعول كومتون يدعم الأساس التجريبي الراسخ للنظرية الجسيمية الفوتونية.

استخدم مفعول كومتون Compton Effect في تشخيص مرض هشاشة العظام Osteoporosis. يجدر بالذكر أن أشعة غاما التي تتميز بأطوال موجية أقصر منها في حالة الأشعة السينية التي تصدر من المنابع المشعة تنتثر عن العظام. تتناسب الشدة الكلية للإشعاع المنتثر مع الكثافة العظمية. يمكن للتغيرات في كثافة العظام أن تؤشر على بداية هشاشة العظام.

تمرين. ما المقدار الذي يتزايد في كل مما يلي لدى انتثار فوتون عن إلكترون بمفعول كومتون: طاقته أم تواتره أم طوله الموجي؟

مثال1. انتثار كومتون. أشعة سينية طولها الموجي 0.142nm تنتثر عن شريحة رقيقة جداً من الكربون. فما الأطوال الموجية للأشعة السينية المنتثرة عند الزوايا: (a) 0^o و (b) 90^o و (c) 180^o؟

الحل. تمثل المسألة مثالاً عن مفعول كومتون:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c}(1-\cos\theta)$$

(a) في الحالة $\theta = 0^\circ$ يكون $\cos\theta = 1$ و $1-\cos\theta = 0$ ومن ثم $\lambda' = \lambda = 0.142\,nm$، وهي نتيجة يمكن إدراكها في الحالة $\theta = 0^\circ$، حيث لا يحدث في الحقيقة أي تصادم نظراً لعبور الفوتون من دون تفاعل.

(b) في الحالة $\theta = 90^\circ$ يكون $\cos\theta = 0$ و $1-\cos\theta = 1$ ومن ثم:

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c} = 0.140\,nm + \frac{6.6\times10^{-34}\,J\cdot s}{9.11\times10^{-31}\,kg\times3\times10^{8}\,m/s}$$
$$= 0.142\,nm + 2.4\times10^{-12}\,m = 0.142\,nm$$

أي إن الطول الموجي أطول بمقدار طول موجة كومتون (ويساوي $0.0024\,nm$=في حالة الانتثار الناظمي)

(c) في الحالة $\theta = 180^\circ$ التي تعني ارتداد الفوتون نحو الجهة التي جاء منها يكون $\cos\theta = -1$ و $1-\cos\theta = 2$ ومن ثم:

$$\lambda' = \lambda + 2\frac{h}{m_0 c} = 0.140\,nm + 2(0.0024\,nm) = 0.145\,nm$$

لاحظ أن أكبر انزياح في الطول الموجي يحدث في الانتثار الخلفي، ويساوي ضعف طول موجة كومتون.

1.2. الطابع المثنوي الموجي الجسيمي للجسيمات المادية

درس الفيزيائي الفرنسي لوي دوبروي الخاصة المثنوية الموجية _الجسيمية التي يتصف بها الإشعاع، وأحس بالتناظر في الكون، وقدم في عام 1924 اقتراحاً مفاده أن للمادة أيضاً طبيعة موجية بالإضافة إلى طبيعتها الجسيمية. ولقد كانت فكرته في ذلك الوقت مخالفة للمفاهيم السائدة، ولم يكن لها أي مسوّغ تجريبي، وبمرور مدة لا تتجاوز ثلاث سنوات أصبح لها مكانة مهمة في أوساط العلماء، وكان لها دور مهمّ في تطوير ميكانيك الكم. وقد حصل في عام 1929 على جائزة نوبل لاكتشافه الطبيعة الموجية للإلكترونات.

فقد قال دوبروي كما أن للإشعاع ذي الطول الموجي λ اندفاعاً خطياً p يعطى بالعلاقة $p=h/\lambda$ يجب أن يكون للجسيم المادي ذي الاندفاع p طول موجي مصاحب له λ يعطى بالعلاقة:

$$\lambda = h/p = h/mv \qquad (1.6)$$

حيث m كتلة الجسيم و v سرعته، و λ طول موجة دوبروي التي ترافق الجسيم المتحرك.

ولقد كانت تجربة دافيسون وجرمر في عام 1927 في الولايات المتحدة أول تأكيد لهذه الفرضية؛ إذ لاحظ هذان العالمان أن توجيه حزمة متوازية من الإلكترونات الوحيدة الطاقة على بلورة نيكل يؤدي إلى تكون نهايات عظمى وصغرى للإلكترونات المنتثرة، ويتشكل مخطط انعراج مشابه تماماً لانعراج الأشعة السينية، ومن المعلوم أن ظاهرة الانعراج هي ظاهرة موجية، الأمر الذي يؤكد أن للإلكترونات طبيعة موجية. وبحساب طول موجة دوبروي المرافقة لإلكترون يتحرك بسرعة $5.9\times10^{6}m/s$ نجد أنها من رتبة $1A^{o}=10^{-10}m$ ومع أن هذا الطول الموجي قصير جداً يمكن كشفه، نظراً لأن التباعد بين الذرات في البلورات يقع في حدود هذه المسافة، لذا يمكن استخدام البلورة شبكة انعراج، حيث يقوم الترتيب المنظم لذرات البلورة بالدور نفسه الذي تقوم به الفتحات في شبكة الانعراج، وبمعرفة المسافات بين الذرات في البلورة وزاوية الانعراج تمكن دافيسون وجيرمر من حساب الطول الموجي المصاحب للإلكترون باستخدام علاقة براغ في الانعراج *Bragg's law* (راجع الفصل5 للتعرف أكثر على هذه العلاقة):

$$2d\sin\theta = m\lambda \qquad (1.7)$$

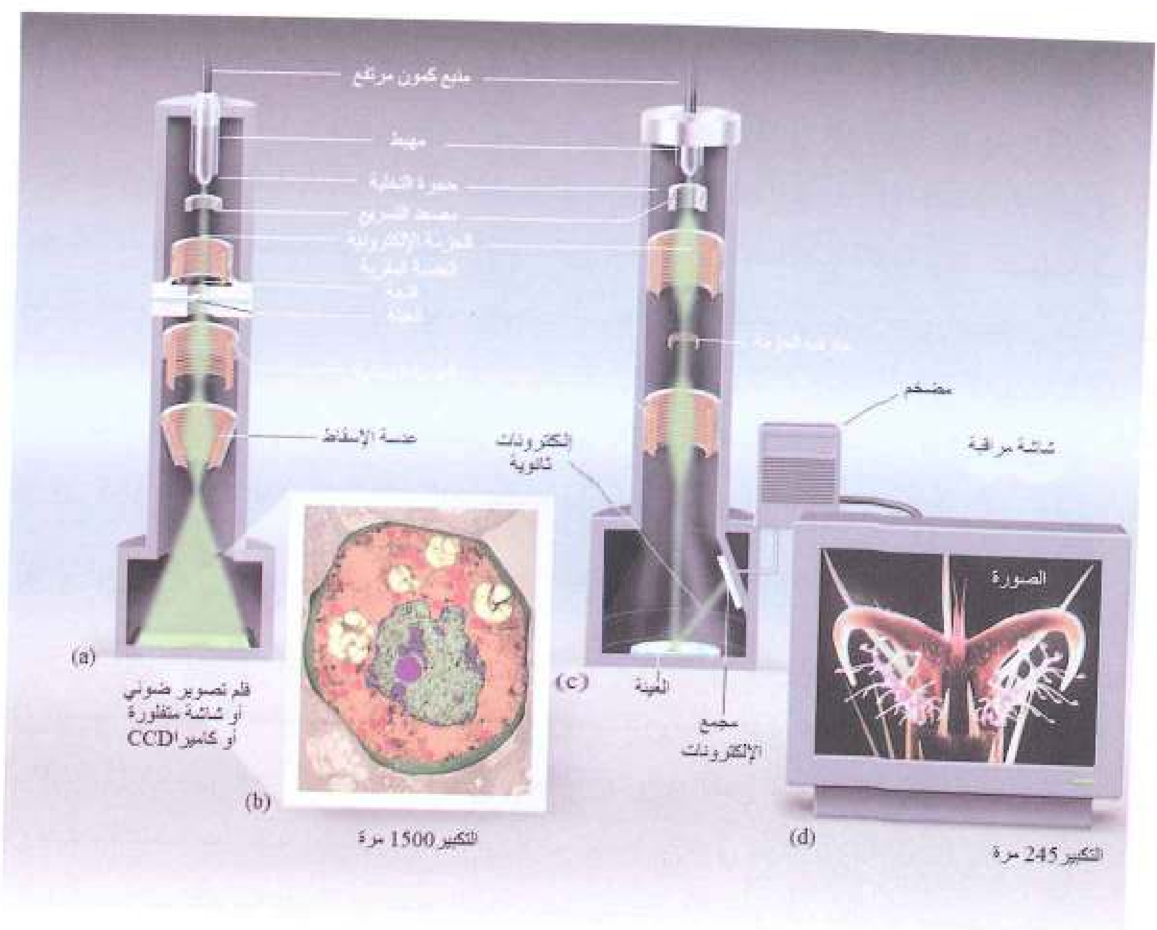
حيث $m=1,2,3,...$ رتبة الانعراج. وقد وجد العالمان أن هذه القيمة مطابقة لما افترضه دوبروي. وقد تلت ذلك تجارب أخرى أثبتت أن للبروتونات والنترونات وجسيمات أخرى خواصّ موجيةً أيضاً.

وقد أدت فكرة الطبيعة الموجية للإلكترونات إلى تصميم مجاهر إلكترونية تكبيرها أعلى بكثير منه في حالة المجاهر الضوئية مادام الطول الموجي المصاحب للإلكترونات أقصر بكثير من الأطوال الموجية للضوء المرئي. وقد أمكن بفضل هذه المجاهر الحديثة دراسة كائنات أصغر بكثير من تلك التي يدرسها المجهر الضوئي، الأمر الذي أسهم في تقدم الكثير من العلوم.

1.2.1. المجاهر الإلكترونية

يحد الانعراج من المقدرة الفاصلة للمجهر الضوئي التقليدي (انظر العدسات في الفصل3 وكتاب العملي). تقدر أصغر مسافة على الجسم يمكن تمييزها (على الصورة المتشكلة بالمجهر) بنصف طول موجة الضوء. باستخدام الطول الموجي 400nm كأقصر طول موجي في المجال المرئي من طيف الإشعاعات الكهرطيسية، يمكن للمجهر الضوئي أن يميز مسافات تقدر بنحو 200nm. وهي تعد مسافة كبيرة على سلم الذرات والجزيئات؛ لا يزيد البعد بين ذرتين في جسم صلب في الحالة النموذجية على 0.2nm.

وللحصول على مقدرة فاصلة أفضل، ثمة إمكانية لاستخدام مجهر بضوء فوق بنفسجي. تستخدم هذه المجاهر أطوالاً موجية بقصر 200nm. وفي حالة أطوال موجية أقصر يصبح من الصعب جداً تصنيع عدسات مناسبة.



الشكل1.3. نوعا المجهر الإلكتروني. إلى اليسار صورة تمثيل للمجهر الإلكتروني بالنفوذ، وإلى اليمين تمثيل للمجهر الماسح الإلكتروني

يمكن بسهولة جعل الطول الموجي الذي يرافق الإلكترونات المسرَّعة نحو 0.2nm فما دون. ولتحقيق ذلك نحتاج إلى تسريع الإلكترونات بفارق كمون قدره 37.4V على الأقل. تكون طاقة الإلكترونات المستخدمة في مجهر إلكتروني Electron Microscope عادة أكبر من ذلك، ومِن ثَمَّ الأطوال الموجية التي ترافقها أقصر. غير أن المقدرة الفاصلة لمجهر إلكتروني تحد منها أيضاً زيوغ – عيوب في العدسات الكهرطيسية المستخدمة في التحكم بحزمة الإلكترونات وتشكيل الصورة؛ إذ تتأثر الإلكترونات المتحركة إما بالحقل الكهربائي المطبق وإما الحقل المغنطيسي وإما بكليهما معاً. يمكن شرح آليات عمل مجهر إلكتروني من دون الحديث صراحة عن طبيعة الإلكترونات. ولقد ذكرنا في ملاحظة في الفصل الثالث أنه يمكن الحصول على مجهر ضوئي باستعمال مجموعة من العدسات برسم الأشعة الضوئية التي تعتمد الضوء

الهندسي. وبالمثل يمكن تعقب مسارات الإلكترونات لدى انحرافها بالعدسات المغنطيسية وانتثارها عن العينة المدروسة. يمتاز المجهر الإلكتروني من المجهر الضوئي بقصر الطول الموجي للإلكترونات، مما يجعل تشكل الأخيلة بالإلكترونات يشمل الأجسام الأصغر بكثير. غير أنّ عيبه أنه يتطلب إجراء تخلية.

1.2.1.1. المجهر الإلكتروني بالنفوذ

للمجاهر الإلكترونية أشكال وأنواع مختلفة. وأقرب هذه المجاهر إلى المجهر الضوئي الشائع يدعى المجهر الإلكتروني بالنفوذ Transmission Electron Microscope أو TEM (الشكل1.3,a,b). عندما تعبر حزمة الإلكترونات العينة، فإن الإلكترونات التي تنتثر عن نقطة في العينة يعاد تجميعها في نقطة على شاشة بعدسة مغنطيسية، مشكلة خيالاً حقيقياً للعينة على الشاشة. يجب على الإلكترونات أن تعبر العينة من دون أن تتباطأ بشكل ملحوظ، ولهذا لا يصلح المجهر TEM إلا في حالة العينات الرقيقة التي لا تزيد ثخانتها على 100nm. يمكن أن يظهر المجهر TEM تفصيلات بقدر 0.2nm، أي أفضل 500 مرة منه في حالة المجهر فوق البنفسجي الذي يعمل بالطول الموجي 200nm.

1.2.1.2. المجهر الماسح الإلكتروني

ثمة شكل آخر للمجهر الإلكتروني هو المجهر الماسح الإلكتروني Scanning Electron Microscope SEM، يستخدم عدسة مغنطيسية لتجميع حزمة الإلكترونات في نقطة على العينة في كل مرة (الشكل1.3c,d). تعمل هذه الإلكترونات الأولية على إخراج إلكترونات ثانوية من العينة؛ يقوم مجمّع للإلكترونات بالكشف عن عدد الإلكترونات الثانوية المتولدة. ويجري حرف حزمة الإلكترونات الأولية على سطح العينة بحارف للحزمة أي يقوم بمسح العينة. يقاس عدد الإلكترونات الثانوية الصادرة عن كل نقطة في العينة، ويلقم إلى حاسب لبناء صورة العينة، ويتدخل هنا عمق اختراق الإلكترونات لسطح العينة المعتمد على طاقة الإلكترونات. المقدرة الفاصلة للمجهر SEM ليس لها الجودة نفسها في المجهر TEM- فهي تقدر بنحو 10nm في أفضل الحالات. غير إن المجهر SEM لا يتطلب عينات رقيقة، ونظراً لأنه حساس لتضاريس العينة فإنه أفضل كثيراً في تصوير بنيات ثلاثية الأبعاد. يظهر في الشكل1.3 الأجزاء الرئيسية لنوعي المجهر الإلكتروني. تسرع الإلكترونات الصادرة من فتيل التسخين في شكلي المجهر الإلكتروني بالحقل الكهربائي بين المهبط والمصعد. (a) تشكل عدسة في المجهر TEM حزمة متوازية، يمكن تخفيض قطرها بإمرارها في فتحة مناسبة. بعد أن تعبر الحزمة العينة، تشكل العدسة الجسمية خيالاً حقيقياً للعينة. تقوم عدسة إسقاط أو أكثر بتكبير الخيال وتسقطه على فلم أو شاشة متفلورة أو كاميرا CCD (charge-coupled device) (أشبه بكاميرا فيديو). (b) صورة مكروية ملونة بنفوذ الإلكترونات لخلية برنشيمية من نبات voodoo lily (Sauromatum guttatum). تظهر في الصورة

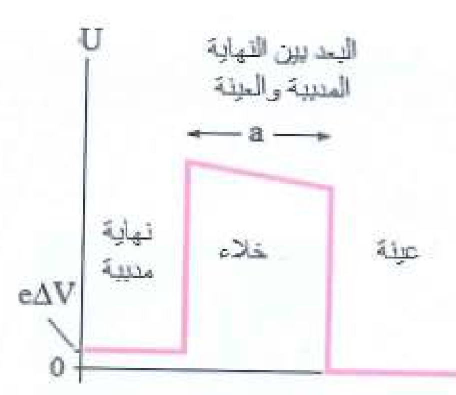
النواة (الأخضر الفاتح) والـ DNA (الأزرق) والمتقدرات (الأحمر) والجدار الخلوي (الأخضر الداكن) وحبيبات النشاء (الأصفر الفاتح). (c) تشكل العدسة في المجهر SEM حزمة ضيقة. يتكون حارف الحزمة من سلسلة من الملفات الكهربائية تحرف الحزمة على سطح العينة. تقوم العدسة الجسمية بتجميع الحزمة الإلكترونية في بقعة صغيرة على العينة. يكشف عن الإلكترونات الثانوية التي يتم إخراجها من العينة عند تلك البقعة بمجمّع الإلكترونات وتلقم الإشارة الكهربائية إلى جهاز مراقبة أو حاسب. (d) صورة مكروية ملونة بالمسح الإلكتروني للوامس وقرني ذبابة الفواكه.

1.2.2. مجاهر إلكترونية أخرى

1.2.2.1. المجهر الإلكتروني الماسح بالنفوذ scanning transmission electron microscope (STEM) الذي يقوم بمسح العينة نقطة فنقطة كالمجهر SEM، ولكنه يكشف عن الإلكترونات النافذة من العينة. هناك نوع آخر من المجاهر الإلكترونية هو المجهر الماسح النفقي.

1.2.2 2. مجهر المفعول النفقي

يستثمر مجهر المفعول النفقي الماسح The scanning tunneling microscope (STM) سلوك الجسيمات المجهرية كالإلكترونات الموصوفة وفق ميكانيك الكم، فإذا صادف إلكترون حاجز كمون لا يرتد تماماً كما في الحالة التقليدية، وإنما يوجد احتمال لعبور الحاجز إذا كان ضيقاً إلى حد كاف؛ يعرف هذا المفعول بالعبور النفقي. يعتمد احتمال العبور النفقي اعتماداً أسياً على ثخانة الحاجز، وهو في هذا المجهر بين رأس مدبب والسطح المدروس، ويعتمد كذلك على فرق الكمون بينهما. يمكن تكبير التيار الإلكتروني المار بينهما للحصول على صورة مكبرة جداً لتضاريس السطوح. في الـ STM تجعل نهاية مدببة معدنية دقيقة جداً بالقرب من السطح المدروس. يجب على النهاية المدببة أن تكون أدق بكثير من إبرة عادية –لا تتضمن عند رأسها في الحالة المثالية إلّا ذرة واحدة. لا يزيد البعد بين النهاية المدببة وسطح العينة في الحالة النموذجية



الشكل1.4. نموذج مبسط للطاقة الكامنة لإلكترون ينتقل من النهاية المدببة لمجهر المفعول النفقي STM إلى العينة مجتازاً المسافة a بالعبور النفقي. يؤدي تطبيق فرق في الكمون ΔV إلى وجود فارق في الطاقة الكامنة قدره $e\Delta V$ بين النهاية المدببة والعينة. يجب عادة تزويد الإلكترون بطاقة تساوي تابع عمل المعدن – الذي يقدر ببضعة إلكترون فولط ليتحرر من المعدن. ونظراً لأن النهاية المدببة والعينة لا يبعد أحدهما عن الآخر إلّا بضعة نانومترات، فإنه يمكن للإلكترون أن يخترق الحاجز الذي يتمثل بتوابع العمل في المعادن، بالعبور النفقي.

عن بضعة نانومترات. كما يجب على المجهر أن يكون معزولاً عن الاهتزازات، ذات السعات التي تصل في الشروط العادية إلى 1000nm أو أكثر. حيث تقع النهاية المدببة والعينة في حجرة مخلاة. بتطبيق فرق صغير في الكمون $\Delta V \approx 10mV$ بين النهاية المدببة والعينة، تجتاز الإلكترونات حاجز الكمون بين النهاية المدببة والعينة الخلاء في هذه الحالة بالعبور النفقي. ينشأ حاجز الكمون الذي تعبره عن الفرق بين تابعي العمل لكل من النهاية المدببة والعينة (الشكل1.4)؛ عندما يقاسان بالنسبة للخلاء. وعندما تمسح النهاية المدببة سطح المعدن يتم التحكم بارتفاعها للحفاظ على ثبات التيار النفقي (الشكل1.5). ويتم التحكم باستعمال حامل للنهاية مصنوع من مواد كهرضغطية تتغير أبعادها بتطبيق كمون عليها، وتكون هذه التغيرات من مرتبة البعد بين النهاية المدببة والسطح. ولما كان التيار يعتمد أساسياً على البعد a، سهل تحريك النهاية المدببة بعد تضخيم هذا التيار وتطبيقه عبر الحامل الكهرضغطي للحفاظ على ثبات a. ومِن ثَمّ فإن حركات النهاية المدببة تعكس بدقة ما تحت السطح. يمكن لمجهر المفعول النفقي أن يصور بسهولة ذرات أحادية على السطح (الشكل1.6).

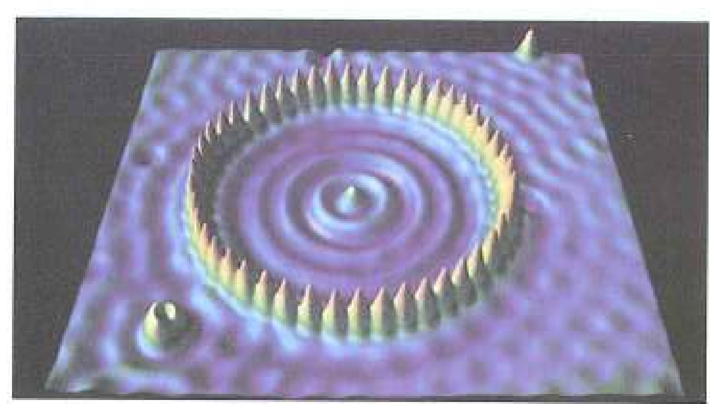


الشكل1.5. (a) شكل تخطيطي لمجهر المفعول النفقي الماسح STM.(b) صورة مكروية بالمفعول النفقي لمقطع في جزيء الـ DNA. يقدر البعد الوسطي بين ملفي اللولب، الذي يُرى على شكل قمم صفراء) بنحو 3.5nm.

وينبغي الإشارة في هذا السياق إلى أن الطبيعة الموجية للأجسام الجهرية التي نصادفها في حياتنا اليومية لا يمكن كشفها، وذلك بسبب كبر الطول الموجي المصاحب لها.

ولقد أسهمت فكرة الطبيعة الموجية للجسيمات في تقدم الفيزياء الحديثة، ذلك لأنها أدت إلى إرساء قواعد ميكانيك الكم على يد شرودنغر وهايزنبرغ بعدها بسنتين كما أنها فسرت مدارات بور وفرضيته تفسيراً معقولاً.

وبعد أن تأكدت الطبيعة الموجية للجسيمات المادية تبين أن هناك تماثلاً في الخاصة المثنوية، فكل من الإشعاع الكهرطيسي والجسيمات المادية تسلك سلوك الموجات والجسيمات. ومبدأ التكامل لبور يطبق على المادة أيضاً، أي إن نموذجي الموجة والجسيم يكمل أحدهما الآخر، إذ يستخدم أحدهما في تفسير بعض الظواهر، ويستخدم الآخر في تفسير ظواهر أخرى.



الشكل1.6. صورة بمجهر المفعول النفقي الماسح لسياج كمومي مكون من 48 ذرة من الحديد، قطره 7.13nm على سطح رقاقة من النحاس، يحتبس الإلكترونات داخله، فتظهر الموجة الإلكترونية المستقرة داخل السياج.

1.3. واحدات قياس طاقة الإشعاعات الكهرطيسية

إن طاقة الجسيم في الفيزياء الذرية والنووية هي من الصغر بحيث يبدو من الصعب التعبير عنها بالجول *Joule* أو الأرغ *erg* (واحدة الطاقة في الجملة السغثية ذات الوحدات الأساسية: السنتمتر والغرام والثانية) ولهذا يستخدم الإلكترون فولط eV كواحدة لقياسها.



الشكل1.7.

يمكن أن نتتبع تعريفه في حالة بسيطة. إذا كانت الصفيحتان a و b لبوسي مكثفة مستوية (الشكل1.7)، تبعد إحدى هاتين الصفيحتين عن الأخرى مسافة d وتخضعان إلى فرق في الكمون قيمته ΔV، فتكون قيمة الحقل الكهربائي بينهما ثابتة وتساوي:

$$E = \left|\vec{E}\right| = \frac{\Delta V}{d} \qquad (1.8)$$

لنفترض أن إلكتروناً e^- على تماس مع الصفيحة b، فستجذبه الصفيحة a في هذه الحالة بقوة $\vec{F}$ تساوي:

$$F = \left|\vec{F}\right| = e \cdot E = e\frac{\Delta V}{d} \qquad (1.9)$$

وتكون الطاقة الحركية التي يكتسبها لحظة وصوله تلك الصفيحة تساوي العمل الذي تقوم به القوة الكهربائية W:

$$W = F \cdot d = e\frac{\Delta V}{d}d = e \cdot \Delta V = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1.10)$$

ومنه العلاقة الأساسية:

$$e \cdot \Delta V = \frac{1}{2} m v^2 \tag{1.11}$$

تقود هذه العلاقة الأساسية إلى التعريف التالي:

الإلكترون فولط eV هو الطاقة الحركية التي يكتسبها إلكترون مسرع في حقل كهربائي يولده فرق في الكمون وقدره فولط واحد، حيث $1eV = 1.6 \times 10^{-19} J$

تستخدم عملياً مضاعفات الإلكترون فولط وهي:

الكيلو إلكترون فولط	$1keV = 10^3 eV$
الميغا إلكترون فولط	$1MeV = 10^6 eV$
الجيغا إلكترون فولط	$1GeV = 10^9 eV$

ولما كان **الإلكترون فولط** واحدة للطاقة، أمكن استخدامه للتعبير عن الطاقة الحركية لجسيم حتى ولو لم يكن مشحوناً.

يستخدم **الإلكترون فولط** كذلك للتعبير عن طاقة فوتونات الإشعاعات الكهرطيسية على الرغم من تجردها من الكتلة السكونية والشحنة.

1.4. خصائص الإشعاعات الكهرطيسية العامة

هي إشعاعات لها طبيعة الضوء نفسها، وتتكون كما يدل اسمها من مركبتين إحداهما لحقل كهربائي والأخرى لحقل مغنطيسي (الشكل1.8)

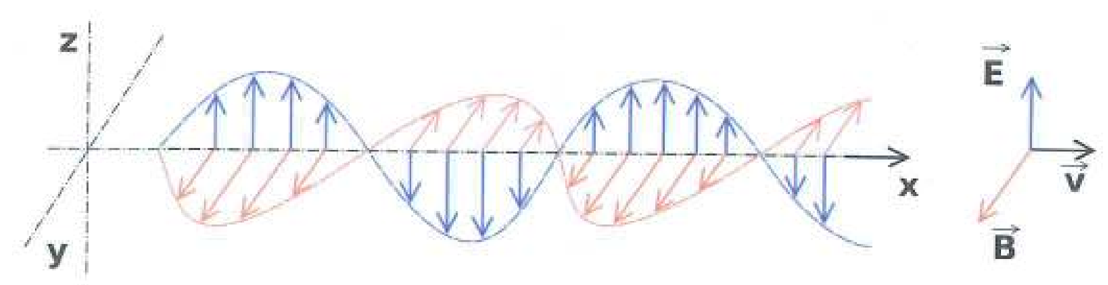
- ليس لها كتلة سكونية (أو كتلتها الحركية صغيرة للغاية $m = \frac{h}{\lambda c}$).
- لا تحمل شحنة كهربائية (لا تنحرف بفعل الحقلين الكهربائي $\vec{E}$ أو المغنطيسي $\vec{B}$).
- تتميز بطبيعة جسيمية وتتألف من كموم الطاقة $E = hf$.
- ذات طبيعة موجية، تتميز بتواترها f أو طول موجتها λ، ويرتبط طول الموجة والتواتر بالعلاقة:

$$\lambda \cdot f = c \tag{1.12}$$

عندما يصبح الطول الموجي للإشعاع قصيراً جداً فيمكن استخدام واحدة الأنغستروم لقياس الأطوال الموجية، حيث $1A^o = 10^{-10} m$.

تصنف أطياف الإشعاعات الكهرطيسية تبعاً لطريقة إنتاجها في نوعين:

- الأطياف المستمرة (أوالمغذاة) التي تولدها هزازات كهربائية ذرية كثيرة كالتي تصدر عن سلك متوهج.
- الأطياف المتقطعة (أو الذرية) التي تصدرها الذرة نفسها في هيئة أقدار ضوئية، يساوي كل منها كماً طاقياً.



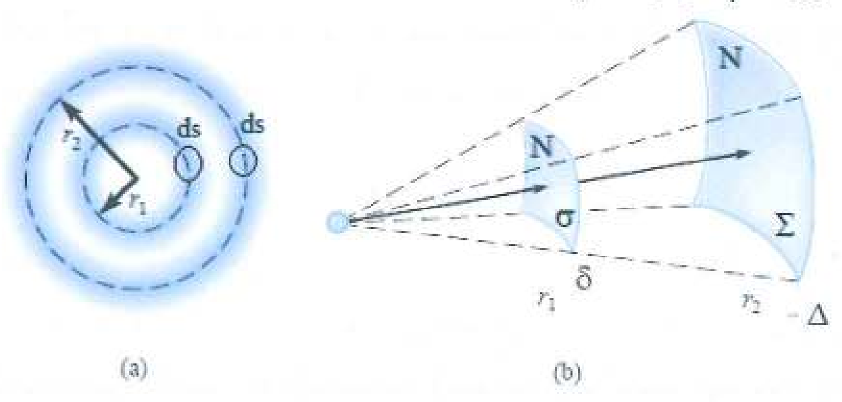
الشكل1.8. إيضاح مركبتي الحقل الكهربائي والحقل المغنطيسي للإشعاعات الكهرطيسية

1.4.1. تدفق الإشعاعات الكهرطيسية

عندما يصدر منبع معزول s إشعاعاً في اتجاهات الفراغ كلها، يدعى الإصدار كروياً أو متماثل المناحي *isotropic* (الشكل1.9a). تقدّر **شدة منبع الإشعاع** بعدد الفوتونات التي يصدرها في واحدة الزمن، في حين يقدر **تدفق الإشعاع** بعدد الفوتونات التي تخترق سطحاً ds واقعاً في نقطة معينة من الفراغ في واحدة الزمن. فعدد الفوتونات التي يستقبلها سطح ds يقع على بعد r_1 خلال المدة dt لا يساوي العدد الذي يستقبله السطح نفسه إذا كان على بعد آخر وليكن r_2 خلال الزمن dt نفسه.

1.4.2. حساب تغير تدفق الإشعاع بدلالة تغير بعد ds عن منبع الإشعاع

لتكن لدينا كرتان نصفا قطريهما r_1 و r_2 على التوالي (الشكل1.9b)، ولنفرض أن المنبع s هو مركزهما المشترك. ولنفرض عليهما السطحين (القبتين الكرويتين) σ و Σ اللذين يمكن أن يتحددا من خلال تقاطع المخروط ذي الرأس s مع الكرتين.



الشكل1.9

يمثل هذا المخروط جزءاً (حزمة) من الإشعاع الكروي الموجة. فإذا كان N يمثل عدد فوتونات حزمة صادرة عن المنبع خلال الفاصل الزمني dt، فإن السطحين σ و Σ سيعترضان العدد نفسه من الفوتونات N، ولكن كثافتيهما السطحيتين δ و Δ في واحدة الزمن لن تكونا متساويتين، (ستكون عند σ أعلى منها عند Σ).

$$\Delta = \frac{N}{\Sigma \cdot dt} \quad \text{و} \quad \delta = \frac{N}{\sigma \cdot dt}$$

ومِن ثَمَّ يكون:
$$\frac{\Delta}{\delta}=\frac{\sigma}{\Sigma}$$

ولما كان سطح الكرة يتناسب طردياً مع مربع نصف القطر ($A=4\pi r^2$) أمكن أن نكتب:

$$\frac{\sigma}{\Sigma}=\frac{r_1^2}{r_2^2} \quad \text{ومِن ثَمَّ يكون:} \quad \frac{\Delta}{\delta}=\frac{r_1^2}{r_2^2} \tag{1.13}$$

فإذا فرضنا أن $r_1=1$، يبدو كما لو أننا افترضنا أن الكرة ذات نصف القطر r_1 كلها منبع للفوتونات (أي منبع غير نقطي) وبذلك نحصل على:

$$\Delta=\delta\cdot\frac{1}{r_2^2} \tag{1.14}$$

أي إن تدفق الفوتونات في نقطة من الفراغ تقع على بعد r_2 من المنبع يتناسب عكساً مع مربع هذا البعد.

1.5. التطورات التي طرأت على الفيزياء الجسيمية

1.5.1. تعديل مفاهيم الميكانيك التقليدي

1.5.1.1. القوانين الأساسية

مع قدوم النظرية النسبية أعيد النظر في المفاهيم الأساسية للفيزياء، فأدخلت تصحيحات لورنتز النسبوية على كل من الكتلة والطول والزمن، لتأخذ في الحسبان التغيرات التي تطرأ عليها في حالة السرعات الكبيرة القريبة من سرعة الضوء؛ ولكن ما يهمنا منها ما له علاقة بتزايد الكتلة مع السرعة.

تتعين كتلة الجسم في حالة السرعات الكبيرة بدلالة سرعته وفقاً للعلاقة:

$$m=\frac{m_0}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \tag{1.18}$$

حيث m_0 كتلة الجسيم في حالة السكون وتدعى الكتلة السكونية و m كتلته وهو في حالة الحركة وهي كما تدل العلاقة تزداد مع زيادة السرعة v. وقد جرى التحقق من هذه النتيجة عملياً عند قياس الشحنة النوعية e/m للإلكترون التي تتناقص مع تزايد سرعته (علماً بأن قيمة شحنة الإلكترون لا تتأثر بحركته) وذلك لدى دراسة أشعة بيتا الصادرة من بعض المواد المشعة.

1.5.1.2. الاندفاع النسبوي

يعرَّف الاندفاع النسبوي(كمية الحركة النسبية) *relativistic momentum* لجسيم بأنه حاصل ضرب كتلته الحركية m في سرعته v وهو مقدار متجه يعطى بالعلاقة:

$$\vec{p}=m\vec{v}=\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \tag{1.19}$$

وهو يشبه الاندفاع التقليدي ولو أن الكتلة في هذه الحالة تمثل الكتلة الحركية m التي تزداد مع السرعة وبذلك يأخذ قانون نيوتن الثاني الشكل التالي:

$$\vec{F}=\frac{d\vec{p}}{dt}=\frac{d}{dt}(m\vec{v})=(\frac{dm}{dt})\vec{v}+m\frac{d\vec{v}}{dt} \qquad (1.20)$$

والحد الأول في المعادلة وهو $\frac{dm}{dt}\vec{v}$ يمثل الحد الإضافي الذي فرضته النظرية النسبية.

1.5.1.3. خاصة تكافؤ الكتلة والطاقة

من تعريف الطاقة الحركية لجسيم متحرك بأنها العمل الذي يجب بذله لنقل الجسيم من حالة السكون إلى حالة الحركة بسرعة معينة نحصل على العلاقة التالية:

$$T=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}-m_0c^2=mc^2-m_0c^2=(m-m_0)c^2 \qquad (1.21)$$

فهي تساوي إذن مقدار ازدياد الكتلة الناجم عن الحركة مضروباً بمربع سرعة الضوء. وقد أطلق آينشتاين على المقدار

$$E_0=m_0c^2 \qquad (1.22)$$

اسم الطاقة السكونية. والطاقة الكلية E هي مجموع الطاقتين الحركية والسكونية:

$$E=E_0+T=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}}=mc^2 \qquad (1.23)$$

وهكذا يوجد للجسيم طاقة سكونية توافق كتلته السكونية وطاقة كلية تتناسب مع كتلته الحركية، ويمثل الفرق بين الطاقتين الطاقة الحركية. وتعدّ علاقة آينشتاين ذات أهمية كبيرة في الفيزياء الحديثة، فهي تبين أن الكتلة والطاقة شكلان لشيء واحد، ويمكن لأحدهما أن يتحول إلى الآخر. أي إن الكتلة السكونية نفسها يمكن أن تتحول إلى طاقة، وعامل التحويل هو مربع سرعة الضوء ويساوي $c^2\approx10^{17}m^2/s^2$. وهذا يعني أن كيلوغراماً واحداً من المادة يتحول إلى 10^{17} *Joule* من الطاقة وهي كمية هائلة.

تقاس الكتلة في الفيزياء الجسيمية بواحدة الكتل الذرية *atomic mass unit (amu)*، وتساوي 1/12 من كتلة ذرة الكربون – 12 أي $1/N_{avo}$ من الغرام حيث N_{avo} عدد أفوكادرو، وهو عدد الذرات الحقيقية الموجودة في الذرة الغرامية الواحدة من كل عنصر $N_{avo}=6.06\times10^{23}$ وقد تم اختياره لتكون الذرة الغرامية للكربون – 12 مساوية 12 غراماً تماماً، يعود الاختيار لأسباب تقنية تتعلق بالحصول على العنصر بنقاوة عالية من الشوائب ومن النظائر الأخرى؛ فقد استعمل الهدروجين والأكسجين لمدة زمنية ثم ترك العمل بهما مع تقدم أدوات قياس الكتلة.

تقدر الذرة الغرامية من الهدروجين في هذه الجملة بنحو 1.007825 *gm*، في حين تقدر الذرة الغرامية من الأكسجين 16 في هذه الجملة بنحو 15.99491 *gm*. ينتج عن ذلك أن كتلة ذرة الكربون تساوي 12 *amu*:

$$1\,amu = 1/N_{avo} = 1/6.06\times10^{23}\,gm = 1.660240\times10^{-24}\,gm$$

وتقدر كتلتا البروتون والنترون بهذه الوحدة:

$$m_n = 1.00866\ amu \text{ و } m_p = 1.00727\ amu$$

يمكن التعبير عن واحدة الكتل الذرية amu بالإلكترون فولط من خلال العلاقة التي تربط بين الكتلة والطاقة:

$$E(J) = m(kg)\,c^2(m^2\sec^{-2}) = 1.66\times10^{-27}\times9\times10^{16}$$

$$E = 14.9\times10^{-11}\,J$$

$$E = \frac{14.9\times10^{-11}}{1.6\times10^{-19}} = 931.478\,MeV$$

ومنه تساوي واحدة الكتل الذرية $1\,amu = 931.5\,MeV$

وتكون الطاقة المكافئة للبروتون: $m_pc^2 = 938.256\,MeV$

والطاقة المكافئة للنترون: $m_nc^2 = 939.550\,MeV$

يلاحظ أن الفارق بين طاقتيهما يقدر بنحو $1.294\,MeV$ لمصلحة النترون، ويسوّغ تحول النترون إلى بروتون: $n \to p^+ + e^- + \bar{\nu}$

وقد أمكن الاستفادة من هذه العلاقة في إنتاج الطاقة النووية حيث يتحول جزء من المادة إلى طاقة في عملية الانشطار أو الاندماج النووي، وهي طاقة هائلة تفوق ملايين أضعاف التفاعلات الكيميائية.

كما أن هناك عملية معاكسة يتم فيها تحول الطاقة الكهرطيسية (شعاع غاما) إلى إلكترون وبوزترون (إلى كتلة) وتدعى عملية توليد الأزواج.

بعد أن تبين إمكانية تحول الكتلة إلى طاقة وبالعكس فإن قانوني انحفاظ الكتلة وانحفاظ الطاقة المنفصلين في الميكانيك التقليدي يصبحان قانوناً واحداً في النظرية النسبية، وينص هذا القانون على أن مجموع الكتلة والطاقة في أي نظام معزول هو ثابت.

أما الشحنة فهي الثابت الوحيد الذي ينتمي إلى الفيزياء التقليدية والفيزياء النسبوية على السواء.

1.5.1.4. العلاقة بين الطاقة والاندفاع:

من المعادلتين (1.19) و(1.23) نحصل:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^{\,2}c^4 \qquad (1.24)$$

وهي من العلاقات المهمّة في النظرية النسبية وهي تربط بين الطاقة الكلية والاندفاع النسبوي. فإذا كان الاندفاع معدوماً، أي إن الجسم في حالة سكون، فهذا يؤدي إلى أن الطاقة الكلية للجسيم تساوي طاقته السكونية.

1.5.1.5. الفوتونات: الفوتون جسيم نسبوي، كتلته السكونية معدومة، يتحرك بسرعة الضوء (يجري التعامل معه كثيراً في النظرية الكمومية) طاقته الكلية E محدودة في حين تحقق كتلته الحركية m العلاقة:

$$E = mc^2 \quad (1.25)$$

وهي ليست إلاّ طاقة حركية، ولإيجاد العلاقة بينها وبين اندفاع الفوتون يمكن تعويض العلاقة (1.18) في (1.24) فنجد:

$$E = pc \quad (1.26)$$

كما يمكن تطبيق هذه المعادلة على كل من الفوتون والنترينو (وهو جسيم ذو كتلة صغيرة جداً جداً ومعتدل الشحنة، ويصدر أثناء التفاعلات النووية) اللذين ينطلقان بسرعة الضوء وعلى الجسيمات العالية السرعة والقريبة من سرعة الضوء.

ونضيف أن بقية قوانين الانحفاظ المعروفة التي نتعرض لها في الميكانيك التقليدي تبقى سارية المفعول مثل انحفاظ الاندفاع النسبوي وانحفاظ الاندفاع الزاوي النسبوي $\vec{L} = \vec{r} \times m\vec{v}$ وانحفاظ الشحنة الكهربائية ...إلخ

هذا يعني أنه لا يوجد تناقض بين النظريتين، وإنما يعتبر الميكانيك النسبوي أعم من الميكانيك التقليدي، ويجدر التنبيه على أن أهمية النظرية النسبية لا تكمن فقط في إجراء حسابات أدق من سابقتها، بل في المفاهيم الجديدة التي طرحتها عن الزمان والمكان النسبيين وفي علاقات الكتلة والطاقة.

1.5.1.6. الكميات المشتقة: ويتلخص التعديل هنا في تكمية كل من الطاقة والاندفاعات الزاوية المدارية (التي تتسبب عن الحركة المدارية) والصميمية الذاتية (التي تنجم عن الحركة السبينية) لكل جسيم داخل النواة وخارجها (انظر الفقرة 2.2).

1.5.1.7. (ستذكر بالتفصيل في فصل الفيزياء النووية) قوانين التأثير المتبادل: ففي حين يسود قانونا الثقالة والكهرطيسية ظواهر الفيزياء التقليدية وكلاهما تتناسب القوة فيهما طردياً مع $1/r^2$، تسود في الذرة تأثيرات قوية قصيرة المدى من مرتبة الأبعاد النووية أي $10^{-15}m$ إضافة إلى التأثيرات الكهرطيسية الضعيفة بعيدة المدى.

1.5.1.8. قوانين الانحفاظ: تخضع التفاعلات النووية في جملة معينة في كل من الفيزياء التقليدية والذرية لقوانين انحفاظ كل من الاندفاع (كمية الحركة) والاندفاع الزاوي والعدد الكتلي والشحنة والطاقة الكلية (التقليدية أو النسبوية). كما تخضع لقوانين انحفاظ الجسيمات الثقيلة في الظواهر النووية المتطورة كالباريونات *barions* (النترونات والبروتونات) والجسيمات الخفيفة أو الليبتونات *leptons* (الإلكترونات والترينوهات).

1.6. ظهور مفاهيم جديدة

1.6.1. مبدأ باولي في الاستبعاد: ولا يطبق إلاّ على الجسيمات التي سبينها يساوي عدداً فردياً من $\frac{1}{2}\hbar$ وتدعى الفرميونات *fermions* (راجع الأعداد الكمومية والاندفاع الزاوي السبيني للإلكترون في الفصل2): وينص على أنه لا يمكن أن يكون لنكليونين أو إلكترونين الحالة الكمومية نفسها أي لا يمكن أن يتساويا بالأعداد الكمومية الأربعة نفسها، بل يجب أن يختلفا بالسبين على الأقل.

1.6.2. جسيمات ديراك المضادة: وهي جسيمات تتمتع بالكتلة وبالسبين نفسيهما للجسيمات العادية المقابلة لها من المادة، ولكنها تعاكسها بخصائصها الكهرطيسية كالشحنة (أو العزم المغنطيسي) ومن الجسيمات المضادة:

البوزترون e^+ وهو الجسيم المضاد للإلكترون e^-

والبروتون المضاد $\overline{p}$ وهو الجسيم المضاد للبروتون p

والنترون المضاد $\overline{n}$ وهو الجسيم المضاد للنترون n

ونذكر في هذا المجال أنه من أهم التفاعلات التي يعتمد عليها استكشاف الجسم البشري في الطب النووي هو تفاعل البوزترون الذي ينتمي إلى المادة المضادة (الذي يصدر من النظائر التي يكون عدد النترونات فيها أقل منه في حالة النظائر المستقرة كالكربون – 11 والأكسجين – 15 والآزوت – 13) مع أحد إلكترونات المادة بعد أن يصل إلى السكون، فيتحولان نتيجة لهذا التفاعل إلى فوتونين غاماويين ينطلقان في اتجاهين متعاكسين طاقة كل منهما نصف مليون إلكترون فولط تقريباً.

$$e^+ + e^- \to \gamma(0.5MeV) + \gamma(0.5MeV)$$

1.6.3. ميكانيك الكم والتابع الموجي

في بداية القرن العشرين، وفي أثناء دراسة النظم المجهرية اكتشفت ظواهر عجزت الفيزياء التقليدية عن تفسيرها، فظهرت فرضيات أضيفت إلى الفيزياء التقليدية لتناسب هذه الظواهر، وانتهى الأمر أخيراً إلى نظرية متكاملة سميت ميكانيك الكم، كان من أهم دعائمها **الطبيعة المثنوية ومبدأ الارتياب.**

سيتناول الفصل الثاني التطورات التي أدت إلى ظهور ميكانيك الكم ومفاهيمه.

الفصل الثاني

بنية الذرّة _ الخصائص الذرّيّة

Atomic Structure & Atomic Properties

سنرى من خلال عرض منجزات الفيزياء وإمكاناتها المعاصرة الدور الذي تؤدّيه الإشعاعات الكهرطيسيّة في استكشاف الجسم البشريّ، وبخاصّة من خلال طرائق التصوير المختلفة بالاعتماد على الأشعة السينيّة كالتصوير الشعاعيّ التقليديّ والتصوير المقطعيّ (الطبقي) المحوريّ. ولكي يتسنّى لنا فهم الآليات الرئيسيّة لتوليد الإشعاعات الكهرطيسيّة ذات المنشأ الذرّيّ والوقوف على أنواعها، لا بدّ من القيام بمراجعة تطور معرفة بنية الذرّة في هذا الفصل، من خلال استعراض النماذج الذرّيّة المختلفة بدءاً من نموذج طومسون ومروراً بنموذجي رذرفورد وبور ثم النموذج الكموميّ لذرّة الهدروجين والتوابع الموجيّة لذرّة الهدروجين والدلالة الفيزيائيّة للأعداد الكموميّة التي تُعرّف حالة الذرّة.

نقوم في هذا الفصل أيضاً بدراسة الخصائص المغنطيسيّة الإلكترونيّة، وذلك للدور المهمّ الذي تؤدّيه هذه الخصائص في سلوك الذرّة، بالإضافة إلى الخصائص النوويّة المناظرة لها، في استكشاف الجسم البشري باللجوء إلى واحدة من أحدث تقنيات الاستكشاف التي تعرف بالرنين (التجاوب) المغنطيسي.

2.1. النماذج الأولى للذرّة

2.1.1. نموذج طومسون

وضع طومسون، في أوائل القرن العشرين، بعد أن اكتشفت الإلكترونات سالبة الشحنة (الأشعة المهبطية) والأيونات الموجبة الشحنة، نموذجاً لبنية الذرّة افترض فيه أنّها مؤلّفة من كريّة ماديّة مصمتة موجبة الشحنة، تتوزّع الإلكترونات فيها بشكلٍ منتظم مثلما تتوضّع البذور في البطيخة الحمراء (الشكل2.1). وقد كان معروفاً قبل ذلك أنّ نصف قطر الذرة يُقدّر بنحو $10^{-10}m$، فإذا افترضنا عدد الإلكترونات في الذرّة Z (العدد الذرّي *atomic number*) وشحنة الإلكترون e فتكون الشحنة الكلّية السالبة Ze وشحنة المادة الموجبة مساوية لها في المقدار لأنّ الذرّة معتدلة كهربائياً.

فإذا اكتسبت الذرّة طاقة خارجيّة (كالحرارة مثلاً)، تهتزّ الإلكترونات حول وضع توازنها وتطلق، بحسب النظريّة الكهرطيسيّة لماكسويل، أشعّة كهرطيسيّة شأنها في ذلك شأن أي جسيم مشحون في حالة تسارع.

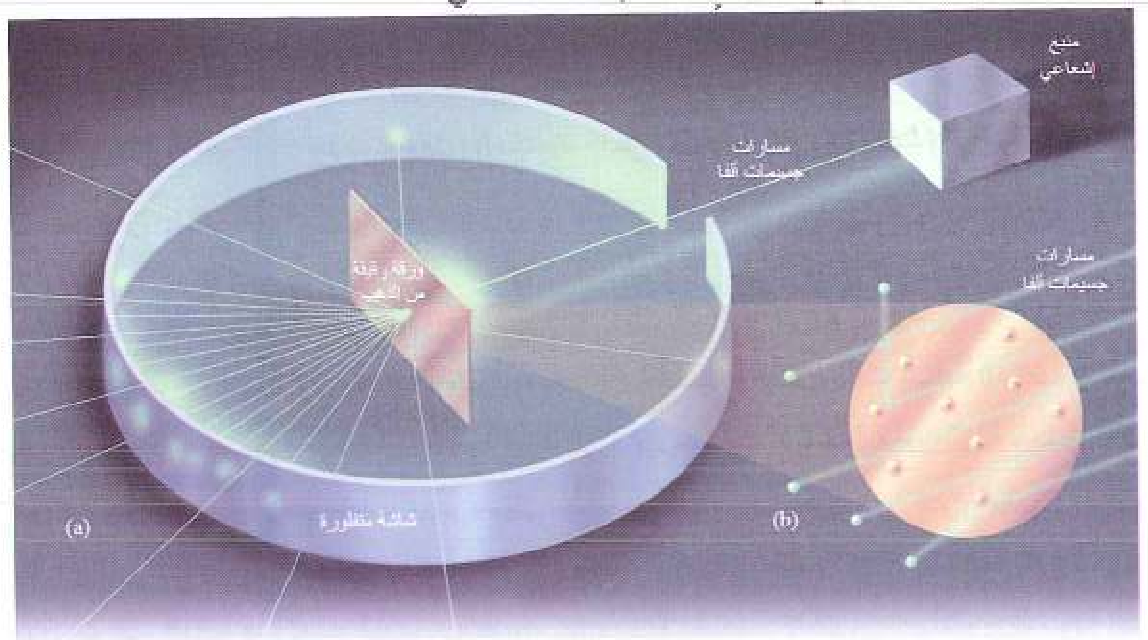
ولكن تبيّن عند استخدام هذا النموذج في حساب الإشعاعات الصادرة من الذرّات، أنّ ذلك يؤدّي إلى نتائج لا تتّفق مع طيف الإشعاعات التجريبيّ، الأمر الذي يدلّ على عدم صلاحية هذا النموذج. ولقد كانت تجربة رذرفورد في تبعثر أشعّة (جسيمات) ألفا دليلاً قاطعاً على عدم صلاحية نموذج طومسون.



الشكل2.1. نموذج طومسون للذرة، وهو كُرَيّة مشحونة إيجابياً تتوزع فيها الإلكترونات السالبة الشحنة

تبعثر جسيمات ألفا

أجرى رذرفورد وطلّابه غايغر ومارسدن عدّة تجارب على تبعثر جسيمات ألفا (الشكل2.2)، وهي جسيمات موجبة الشحنة الكهربائية، قيمة شحنة كل منها ضعف شحنة الإلكترون $2e$، وهي تصدر من بعض النظائر المشعة كالراديوم. تبين أنه عند توجيه حزمة جسيمات ألفا السريعة نحو شريحة رقيقة من الذهب أنّ قسماً كبيراً من هذه الجسيمات يمرّ بشكلٍ مستقيمٍ من خلال الشريحة أو ينحرف بزوايا صغيرة، إلاّ أنّ بعضها ينحرف بزوايا كبيرة، بل إنّ عدداً منها يرتدّ بزاوية $180°$ تقريباً. وقد كانت نتيجة هذه التجربة مفاجأة مذهلة له، وهذا يدلّ على أنّ جسيمات ألفا قد اصطدمت بشيء صغيرٍ جداً، ولكنّه لا متناهي الكثافة.



الشكل 2.2. تجربة تبعثر رذرفورد.

من الواضح أنّ انحراف جسيمات ألفا الموجبة ينجم عن القوى الكهربائيّة المتولّدة نتيجة لاقترابها من شحنات موجبة أو سالبة في ذرّة الذهب. فلو كان نموذج طومسون الذي يقضي بتوزّعٍ منتظمٍ للشحنات الموجبة والسالبة في كلّ حجم الذرّة صحيحاً، لكان على جميع جسيمات ألفا أن تنحرف بزوايا صغيرة

نسبياً ولا يمكن لأيّ منها أن يعكس اتجاهه أو ينحرف بزاوية كبيرة. وبذلك لا يمكن تبرير ما حدث إلاّ إذا افترضنا أنّ الشحنات الموجبة تتجمّع في حيّزٍ صغيرٍ جدّاً في مركز الذرّة في حين يكوّن باقي حجم الذرّة فضاءً واسعاً شبه فارغ كما يبيّن الشكل 2.3.

2.1.2. نموذج رذرفورد

افترض رذرفورد في عام 1911 أنّ الشحنة الموجبة تتمركز في حجمٍ صغيرٍ جدّاً بالنسبة إلى حجم الذرّة لا يزيد نصف قطره على $10^{-14}m$ أي إنه يقارب 10^{-4} من نصف قطر الذرّة. وهذا الجزء الموجب الشحنة هو الذي يتركّز فيه معظم كتلة الذرّة، ويدعى النواة، في حين تتوزّع الإلكترونات في الفضاء الشاسع الذي يحيط بها. فإذا فرضنا أنّ الإلكترونات في وضعٍ ثابتٍ حول النواة فإنّها لا بدّ لها من أن تسقط على النواة نتيجة الجذب الكهربائيّ، ويضمحلّ بذلك نصف قطر الذرّة إلى نصف قطر النواة تقريباً، ولكنّ ذلك مخالفٌ للنتائج العملية. وكي يفسّر رذرفورد عدم انجذاب الإلكترونات بفعل القوّة الكهربائيّة إلى داخل النواة موجبة الشحنة، اقترح في نموذجه أن تتحرّك الإلكترونات على مداراتٍ حول النواة، بنفس الطريقة التي تدور وفقها الكواكب حول الشمس، ولهذا السبب يُطلق على هذا النموذج اسم النموذج الكوكبي (الشكل 2.3).

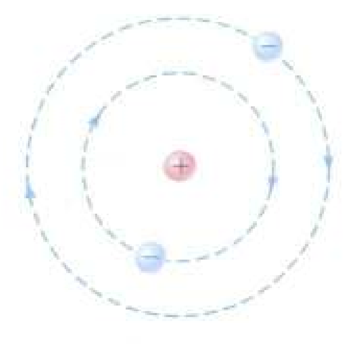
بناءً على هذا النموذج أمكن تفسير تبعثر جسيمات ألفا عند مرورها في شريحة الذهب، إذ إنّ معظم جسيمات ألفا تمرّ بعيداً عن النواة (في الفضاء الشاسع حولها)، لذا فإنّها تنحرف بزوايا صغيرة أو لا تنحرف. أما الجسيمات التي تقترب من النواة _ ونسبتها قليلة بسبب صغر حجم النواة _ فإنها تتعرّض لقوى تنافر كهربائيّة شديدة، الأمر الذي يجعلها تعاني انحرافاً كبيراً أو ترتدّ ثانية (الشكل2.2).

ويمكن حساب أقصر بعد D عن النواة يمكن أن يقترب منه جسيم ألفا قبل أن يرتدّ، وذلك بالاعتماد على أنّ الطاقة الحركية K_α التي كان يحملها جسيم ألفا تتحوّل بكاملها إلى طاقة كهربائيّة كامنة U_α وفقاً للمعادلة التالية:

$$U_\alpha = k_e \frac{Ze \times 2e}{D}$$

حيث $k_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\times10^9 N.m^2/C^2$ ثابت القوّة الكهربائيّة (ثابت كولون)، و Z العدد الذرّي لمادّة الهدف و $e = 1.6\times10^{-19}C$ شحنة الإلكترون، و ε_0 سماحيّة الخلاء للحقل الكهربائيّ وبذلك يكون أقرب بعد:

$$D = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Ze^2}{K_\alpha} \qquad (2.1)$$



الشكل2.3. نموذج رذرفورد

يمكن لهذا البعد عن مركز النواة أن يعطي فكرة تقريبيّة عن نصف قطر النواة كما يوضح ذلك المثال التالي:

مثال. تُقدّر الطاقة الحركيّة لجسيم ألفا، في تجربة تبعثر جسيمات ألفا في شريحة من الذهب، بنحو $7.68MeV$. ما أقرب بعد لجسيمات ألفا عن النواة، علماً بأن العدد الذرّي للذهب $Z = 79$.

الحل. تُحوّل طاقة جسيم ألفا إلى الجول:

$$K_\alpha = 7.68\times10^6\times1.6\times10^{-19}J$$

وبالتعويض عن كل من شحنة الإلكترون والعدد الذرّي وثابت كولون نجد:

$$D = 9\times10^9\,\frac{2\times79(1.6\times10^{-19})^2}{7.68\times1.6\times10^{-13}} = 3.0\times10^{-14}m$$

وهكذا يمكن القول إنّ نصف قطر النواة أصغر من $3.0\times10^{-14}m$. وقد أجريت لاحقاً حسابات أدقّ باستعمال جسيمات ألفا طاقتها أكبر، وقد تبيّن أنّ القيمة المعروفة حالياً لنصف قطر نواة الذهب تبلغ سدس القيمة السابقة.

كان على النموذج بعد أن نجح في تفسير تبعثر جسيمات ألفا أن يفسر نتائج أخرى متراكمة من دراسة أطياف المواد المختلفة.

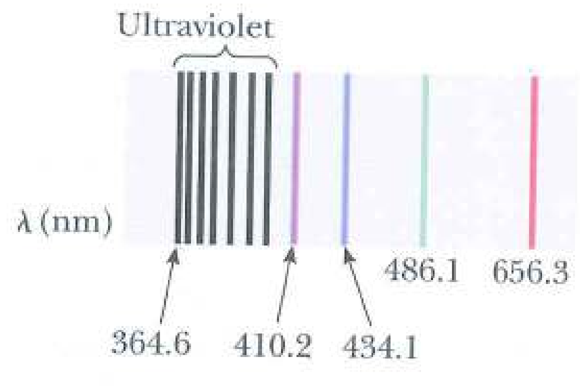
الطيف الذرّي. عندما ترتفع درجة حرارة الجسم الصلب ارتفاعاً شديداً فإنّ هذا الأخير يتوهّج ويصدر طاقة إشعاعيّة تظهر لدى تحليلها بالمطياف (الذي يستخدم شبكة انعراج مثلاً) على شكل طيف مستمرّ من الأطوال الموجيّة (إشعاع الجسم الأسود وفرضية بلانك).

أما إذا حلّلنا الضوء الصادر عن مصباح انفراغ كهربائيّ يحوي غازاً معيّناً كالهدروجين أو النيون مثلاً في ضغطٍ منخفض، فإنّنا نجد أنّ الطيف الناتج متقطّعٌ وليس مستمرّاً، أي إنّه مؤلّفٌ من عدّة خطوط مستقيمة مضيئة تفصل بينها مناطق عاتمة. وهو يسمى طيف الإصدار وهو مميّزٌ لكلّ غازٍ ويفيد في تحديد هويّته.

وإذا وجّهنا طيفاً ضوئيّاً مستمرّاً من خلال غازٍ ما، ثم حلّلنا الطيف الناتج نلاحظ وجود خطوط عاتمة على الطيف تطابق الخطوط المضيئة التي لوحظت في طيف الإصدار للغاز نفسه. يسمى هذا الطيف المستمرّ بوجود الخطوط العاتمة "طيف الامتصاص الغازيّ". ولما كان الطيف مميّزاً للعنصر فقد كان لطيف الامتصاص دورٌ كبير في اكتشاف العناصر الكيميائيّة في الأجرام السماوية البعيدة، كما أنّ له أهميّة كبيرة في التحليل الكيميائيّ، وهذا ما يتوجب تفسيره.

وقد لاقى طيف الهدروجين نصيباً كبيراً من الاهتمام والدراسة، إذْ لوحظ وجود عدّة مجموعات من الخطوط الطيفيّة توجد بين تواتراتها أو أطوالها الموجية علاقات بسيطة نُسبت فيما بعد إلى أسماء مكتشفيها. وكانت أولى هذه السلاسل هي سلسلة بالمر *Balmer series* في مجال الضوء المرئيّ والمجال فوق البنفسجيّ، وقد اكتشفت في عام 1885. كما اكتشف ليمان *Lyman* سلسلة أخرى في المجال فوق البنفسجي. واكتشف باشن *Paschen* سلسلة في المجال تحت الأحمر، واكتشف آخرون سلاسل أخرى.

ويبين الشكل (2.4) الخطوط الطيفيّة الموافقة لسلسلة بالمر. وقد أوجد هؤلاء العلماء مجموعة من المعادلات تسمح بحساب الأطوال الموجيّة الموافقة لخطوط كل سلسلة، ويبين الجدول 2.1 قائمة بهذه السلاسل مع معادلاتها. ويُلاحظ أنّ الشكل العام لها هو التالي:



الشكل 2.4. سلسلة بالمر في طيف الهدروجين

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2}\right) \qquad (2.2)$$

حيث $R_H = 1.097 \times 10^7 m^{-1}$ ثابت ريدبرغ، λ الطول الموجيّ الموافق للخطّ و n_1 أيّ عدد صحيح أكبر أو يساوي الواحد (وهذا العدد يحدّد اسم السلسلة) و n_2 أيّ عدد صحيح أكبر أو يساوي $n_1 + 1$ (وهو يحدّد الخطوط المتتابعة في السلسلة الواحدة). ففي حالة $n_1 = 1$ و $n_2 = 2, 3, ...$ نحصل على سلسلة ليمان، وأطول أمواج هذه السلسلة $121.5nm$ ويوافق $n_2 = 2$ وأقصرها $91.1nm$ ويوافق $n_2 \to \infty$ وفي حالة $n_1 = 2$ و $n_2 = 3, 4, ...$ نحصل على سلسلة بالمر، وهكذا ..

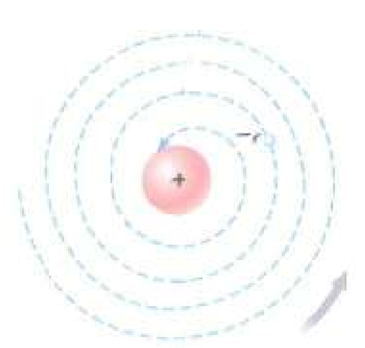
الجدول 2.1. بعض السلاسل الطيفيّة للهدروجين

السلسلة	مجال الطول الموجي	قيم العدد n_2	المعادلة
سلسلة ليمان	فوق البنفسجي	2,3,4,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_2^2})$
سلسلة بالمر	مرئي وفوق البنفسجي	3,4,5,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2})$
سلسلة باشن	تحت الأحمر	4,5,6,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n_2^2})$
سلسلة براكت	تحت الأحمر	5,6,7,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n_2^2})$
سلسلة بفند	تحت الأحمر	6,7,8,...	$\frac{1}{\lambda} = R_H(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n_2^2})$

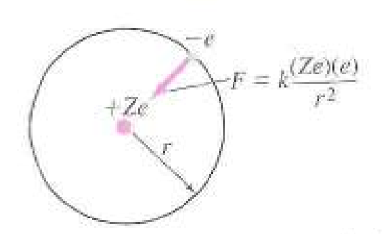
فشل نموذج رذرفورد. بعد أن استقرّ الرأي على اعتماد نموذج رذرفورد وُجّهت إليه بعض الانتقادات سواء من حيث استقرار الذرّة أم من حيث تفسير خطوط الطيف، ذلك أنّ رذرفورد افترض أنّ الإلكترونات تدور حول النواة في حركةٍ مشابهة لحركة الكواكب حول الشمس، كما سبق أنْ ذكرنا. يبدو هذا النظام مستقراً ميكانيكياً حيث يتوازن الإلكترون بفعل قوّة جذب النواة الموجبة والقوّة الطاردة المركزيّة الناتجة عن دورانه حول النواة (الشكل 2.6) حسب العلاقة التالية:

$$m\frac{v^2}{r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Ze^2}{r^2} \qquad (2.3)$$

حيث v سرعة الإلكترون في دورانه حول النواة و m كتلته و r نصف قطر مداره. ولكن هذه الفرضيّة لا تحلّ المشكلة ذلك أنّ الإلكترون وهو يدور حول النواة يمتلك تسارعاً مركزيّاً مقداره v^2/r، وأيّة شحنة متسارعة لا بدّ لها، حسب النظريّة الكهرطيسيّة، من أن تصدر إشعاعات تحمل طاقةً كهرطيسيّة بشكلٍ مستمرٍّ، وتكون هذه الطاقة على حساب الطاقة الكلّية للإلكترون في مداره، الأمر الذي يسبب اقتراب الإلكترون من النواة بشكلٍ تدريجيٍّ حتى يسقط عليها كما يبيّن الشكل 2.5. وهذا يعني أنّ نموذج رذرفورد يؤدّي إلى تناقضين رئيسيّين أوّلهما أنّه يتوقّع أن تصدر الذرّة طيفاً مستمراً من التواترات في حين تثبت التجربة وجود خطوط طيفيّة متقطّعة، وثانيهما أنّه يؤدّي إلى اضمحلال نصف قطر الذرّة إلى نصف قطر النواة، وهذا يخالف النتائج التجريبيّة، الأمر الذي حدا ببور إلى اقتراح نموذج للذرّة يتلافى فيه هذه التناقضات.



الشكل2.5. انهيار الذرّة وفقاً لنموذج رذرفورد.



الشكل 2.6. قوة كولون الكهربائية بين الإلكترون السالب والنواة المشحونة إيجابياً هي التي تبقيه في مداره حولها.

2.2. نموذج بور لذرّة الهدروجين

اقترح نيلز بور عام 1913، نموذجاً جديداً لذرّة الهدروجين تغلّب فيه على الصعوبات التي اعترت النموذج الكوكبيّ الذي كان رذرفورد قد اقترحه. استخدم بور في نموذجه أفكار بلانك المرتبطة بتكمية سويّات الطاقة، وطبّقها على الإلكترونات الذرّية على مداراتها التي تحدّث عنها رذرفورد في نموذجه الذرّي. وقد أدّت نظرية بور، تاريخيّاً، دوراً مهمّاً في تطوّر الفيزياء الكموميّة، وشرحت بشكلٍ جيد سلاسل خطوط طيف إصدار ذرّة الهدروجين. وبالرغم من أنّ نموذج بور لذرّة الهدروجين يُعتبر الآن تقليدياً وغير كافٍ،

وتمّ استبدال نظرية ميكانيك الكم به، بشكلٍ كاملٍ، لشرح الخصائص الذرّيّة، حافظ على أهمّيته في تطوير مفاهيم تكمية الطاقة والاندفاع الزاويّ في حالة جملٍ بحجم الذرّة.

جمع بور بين أفكار النظريّة الكموميّة بنسختها الأوّلية لبلانك، ومفهوم الفوتون الذي تحدّث عنه إينشتاين، والنموذج الكوكبيّ الذي اقترحه رذرفورد للذرّة، وميكانيك نيوتن التقليديّ، ليصل في النهاية إلى نموذجٍ نصف كلاسيكيّ ببنيته الأساسيّة مع الاعتماد على بعض الأفكار الثوريّة في تلك الحقبة. يمتلك النموذج البنيويّ لبور في نظريّته عند تطبيقه على ذرّة الهدروجين الخصائص الآتية:

2.2.1. المكوّنات الفيزيائيّة للنموذج

يتحرّك الإلكترون على مداراتٍ دائريّةٍ حول البروتون في ذرّة الهدروجين بتأثير قوّة التجاذب الكهربائيّ بينهما (الشكل 2.7).

يُسمح للإلكترون أن يتحرّك على مداراتٍ دائريّة معيّنة بأنصاف أقطارٍ محدّدة.

الشكل2.7. مخطّط يمثّل نموذج بور لذرّة الهدروجين

2.2.2. سلوك المكوّنات الفيزيائيّة

1. افترض بور، مستمداً الفكرة من الأمواج المستقرة في الأوتار، وجود بعض المدرات الإلكترونيّة مستقرّة. وإذا وُجد الإلكترون في حالةٍ طاقيّةٍ موافقةٍ لمدارٍ مستقرّ، أو في "حالةٍ مستقرّة" كما أسماها بور، لا يُصدر الإلكترون أيّ إشعاع، حتّى لو كان متسارعاً. وتبقى، عندئذٍ، الطاقة الكلّيّة للذرّة ثابتةً، ويمكن تطبيق الميكانيك التقليديّ لوصف حركة الإلكترون حول نواته في هذه الحالة. أي إنّ بور يدّعي في نموذجه أنّ الإلكترون المتسارع بفضل قوّة الجذب المركزيّ المطبّقة عليه من قبل البروتون لا يُشعّ باستمرارٍ، ولا يفقد طاقته، ومِن ثَمّ لا يلتفّ بشكلٍ لولبيٍّ مقترباً من النواة كما تتنبأ الفيزياء التقليدية التي طبّقها رذرفورد في نموذجه الكوكبيّ.

2. تصدر الذرّة إشعاعاً لدى انتقال الإلكترون من حالةٍ أوّليّةٍ مستقرّةٍ للطاقة، إلى حالةٍ مستقرّةٍ أخفض للطاقة، وفق النموذج الجديد. وأنه لا يمكن شرح أو معالجة هذه الانتقالات الطاقيّة بشكلٍ تقليديّ. وبشكلٍ خاصّ، يرتبط تواتر الفوتون الصادر بتغيّر طاقة الذرّة بين الحالتين الابتدائيّة والنهائيّة للطاقة، ولا يساوي تواتر الإلكترون على مداره. يمكن إيجاد قيمة تواتر الفوتون الصادر باستخدام علاقة انحفاظ الطاقة:

$$E_i - E_f = h\,f \qquad (2.4)$$

حيث E_i طاقة الحالة الابتدائيّة للذرّة، E_f طاقة الحالة النهائيّة لها، ولدينا $E_i > E_f$. يمكن، إضافةً إلى ذلك، أن تمتصّ الذرّة طاقة فوتونٍ واردٍ إليها، إذا كانت طاقته مساويةً تماماً للفرق بالطاقة بين حالة مسموحةٍ للذرّة وحالةٍ مسموحةٍ أعلى طاقةً لها. يختفي حينئذٍ الفوتون وتنتقل الذرّة إلى حالة الطاقة الأعلى.

3. يتحدّد حجم المدار المسموح للإلكترون حول نواته بالشرط المفروض على اندفاعه المداريّ الزاويّ: توافق المدارات المسموحة للإلكترون قيماً محدّدة للاندفاع المداريّ الزاويّ له حول النواة، بحيث تكون هذه القيم مساويةً لعددٍ صحيحٍ من $\hbar = h/2\pi$.

$$m_e v r = n\hbar \qquad n = 1,2,3,...... \tag{2.5}$$

حيث m_e كتلة الإلكترون، v سرعته على مداره، وَ r نصف قطر المدار.

تعتبر هذه الفرضيّات مزيجاً من مبادئ مبرهنةٍ تماماً وأفكارٍ جديدةٍ كليّاً بنفس الوقت. تتم في الفرضيّة (1) مثلاً معالجة الإلكترون على مداره حول النواة بشكلٍ مشابهٍ لمعالجة حركة كوكبٍ على مدارٍ دائريٍّ حول نجمٍ باستخدام نموذج الحركة الدائريّة المنتظمة في الميكانيك التقليديّ. أما الفرضيّة (2) فقد اعتبرت فكرة جديدة بشكلٍ جذريٍّ عام 1913، وكانت غير متوافقة مع مفاهيم النظرية الكهرطيسيّة المعروفة جيّداً في ذلك الوقت. وتعبّر هذه الفرضيّة عن مبدأ انحفاظ الطاقة لدى تطبيقه على جملة غير معزولة. وأخيراً تُمثّل الفرضيّة (3) فكرةً جديدةً أخرى في التكمية ليس لها أساس في الفيزياء الكلاسيكيّة.

كما تشير الفرضيّة (2) ضمناً إلى وجود طيف خطوط إصدارٍ متقطّعٍ مميّز لذرّة الهدروجين، وكذلك إلى وجود طيف خطوط امتصاصٍ متقطّع مميّز لها أيضاً. لنحسب، فيما يلي، باستخدام فرضيّات بور السابقة سويّات الطاقة المسموحة والقيم العدديّة للأطوال الموجيّة الموافقة لإصدار ذرّة الهدروجين.

تُعطى الطاقة الكهربائيّة الكامنة للجملة (إلكترون – بروتون) بالمعادلة: $U = k_e q_1 q_2 / r = -k_e e^2 / r$

حيث k_e هو ثابت كولون للقوّة الكهربائيّة، وتدلّ الإشارة السالبة على الشحنة $-e$ للإلكترون. وبهذا تساوي الطاقة الكليّة للذرّة، وهي مجموع كلٍّ من الطاقة الكامنة للجملة والطاقة الحركيّة للإلكترون:

$$E = K + U = \frac{1}{2} m_e v^2 - k_e \frac{e^2}{r} \tag{2.6}$$

يعتبر بور الإلكترون في نموذجه لذرّة الهدروجين جسيماً يتحرّك على مداره بحركة دائريّةٍ منتظمة، ولهذا السبب ينبغي أن تكون القوّة الكهربائيّة $k_e e^2 / r^2$ المؤثّرة عليه أثناء حركته مساويةً ناتج ضرب كتلته m_e بتسارعه المركزيّ $a_c = v^2 / r$:

$$\frac{k_e e^2}{r^2} = \frac{m_e v^2}{r} \Rightarrow v^2 = \frac{k_e e^2}{m_e r} \tag{2.7}$$

من المعادلة الأخيرة يمكن حساب الطاقة الحركيّة للإلكترون على مداره بالعلاقة:

$$K = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{k_e e^2}{2r} \tag{2.8}$$

نعوّض علاقة الطاقة الحركيّة للإلكترون في علاقة الطاقة الكلّيّة فينتج لدينا:

$$E = -\frac{k_e e^2}{2r} \qquad (2.9)$$

إنّ قيمة الطاقة الكلّيّة للجملة سالبة، وهذا يعني أنّ الجملة مقيّدة، وأنّه ينبغي تزويد ذرّة الهدروجين بطاقةٍ مقدارها $k_e e^2 / 2r$ لانتزاع الإلكترون منها، وعندئذٍ تصبح الطاقة الكلّيّة للذرّة معدومةً.

كما يمكن الحصول على عبارة r_n نصف قطر المدارات المسموحة للإلكترون بحساب سرعة الإلكترون v من المعادلة (2.5) ومساواتها بالمعادلة (2.7):

$$v^2 = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e^2 r^2} = \frac{k_e e^2}{m_e r} \Rightarrow r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m_e k_e e^2} \qquad n = 1,2,3,... \qquad (2.10)$$

تدلّ المعادلة (2.10) على أنّ لأنصاف أقطار المدارات المسموحة للإلكترون قيماً متقطّعة: أي إنّها مكمّاة. تعتمد هذه النتيجة على الفرضية (3) في نموذج بور التي تقتضي وجود الإلكترون على مدارات محدّدة معرّفة بالعدد الصحيح n.

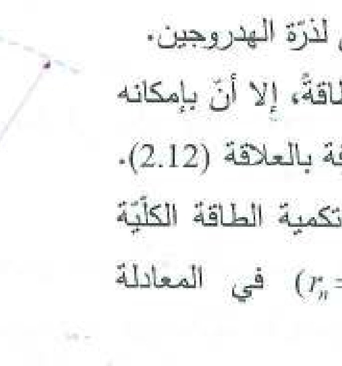
يقابل المدار الأصغر للإلكترون نصف القطر a_0، والذي يُطلق عليه اسم نصف قطر بور، وهو يوافق $n = 1$، وقيمته:

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{m_e k_e e^2} = 0.0529\, nm \qquad (2.11)$$

ولدى تعويض المعادلة (2.11) في المعادلة (2.10) نحصل على عبارةٍ عامّة لنصف قطر أيّ مدارٍ لذرّة الهدروجين:

$$r_n = n^2 a_0 = n^2 (0.0529\, nm) \qquad n = 1,2,3,...... \qquad (2.12)$$

يبيّن الشكل 2.8 مدارات بور الثلاثة الأولى لذرّة الهدروجين. تمّ تمثيل الإلكترون على المدار الأخفض طاقةً، إلا أنّ بإمكانه الوجود في أيٍّ من المدارات المسموحة المعرّفة بالعلاقة (2.12). تؤدّي تكمية أنصاف أقطار المدارات إلى تكمية الطاقة الكلّيّة لذرّة الهدروجين. بتعويض قيمة $(r_n = n^2 a_0)$ في المعادلة (2.9) نجد:



الشكل 2.8. المدارات الثلاثة الأولى للإلكترون في ذرّة الهدروجين بحسب نموذج بور.

$$E_n = -\frac{k_e e^2}{2 a_0}\left(\frac{1}{n^2}\right) \qquad n = 1,2,3,... \qquad (2.13)$$

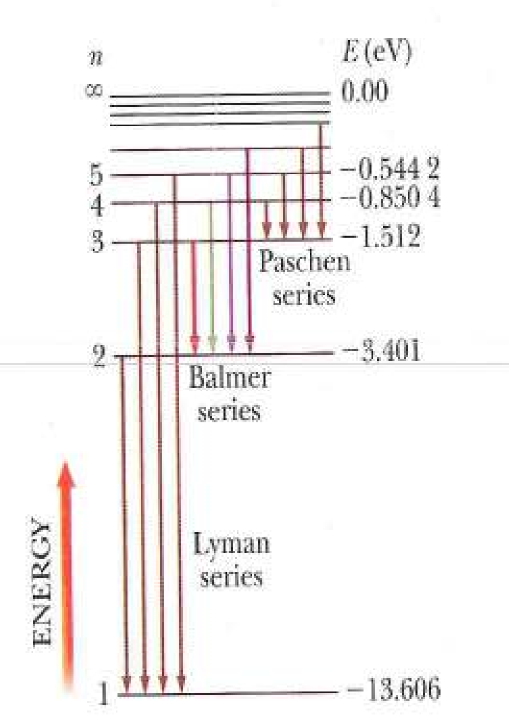
وبتعويض القيم العددية للثوابت في المعادلة (2.13)، نجد أنّ:

$$E_n = -\frac{13.606\, eV}{n^2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (2.14)$$

إنّ قيم الطاقة التي تحقّق المعادلة السابقة هي فقط المسموحة. توافق الطاقة الدنيا المسموحة، القيمة $n=1$، وتساوي $E_1 = -13.606\, eV$، ويُطلق عليها اسم الحالة الأساسيّة أو الأرضيّة لذرّة الهدروجين.

بينما توافق سويّة الطاقة التالية القيمة $n=2$، وتساوي $E_2 = E_1/2^2 = -3.401\, eV$، وهي الحالة المثارة الأولى لذرّة الهدروجين.

يُظهر مخطّط سويّات الطاقة الممثّل في الشكل(2.9) حالات الطاقة المكمّاة وقيم العدد الكموميّ n المرافق لها. تقابل أعلى سويّة طاقة قيمة العدد الكمومي $n=\infty$ حيث $r=\infty$، وقيمة الطاقة $E=0$. الأسهم الملوّنة في الشكل تقابل في سلسلة بالمر وتدلّ على أنّ هذه الإصدارات تنتمي إلى المجال المرئيّ.



الشكل 2.9. مخطّط سويّات الطاقة لذرّة الهدروجين. العدد الكموميّ n معطى على يسار الشكل، والطاقة الكليّة E الموافقة (مقدّرةً بالـ eV) على يمين الشكل. تشير الأسهم الشاقولية إلى الانتقالات الأربعة الأخفض طاقةً لكلٍّ من السلاسل الطيفيّة ليمان وبالمر وباشن.

تتناسب الطاقات المسموحة لذرّة الهدروجين عكساً مع n^2، أي إنّ الفواصل بين السويّات الطاقيّة المتتابعة تقلّ بازدياد قيمة n. كما تقترب الفواصل بين سويّات الطاقة من قيمة الصفر عندما تقترب قيمة n من اللانهاية، وتقترب قيمة طاقة ذرّة الهدروجين من الصفر أيضاً. تمثّل قيمة الطاقة "صفر" الحدّ الفاصل بين الحالة المقيّدة للجملة (إلكترون – بروتون) والحالة غير المقيّدة لها. أي إنّ ذرّة الهدروجين تغدو مؤيّنة إذا انتقلت من حالتها الأرضيّة إلى حالةٍ توافق طاقةً أكبر من الصفر.

يُطلق على الطاقة الدّنيا التي ينبغي تزويد ذرة الهدروجين في حالتها الأرضية كي تتأيّن، اسم طاقة التأيّن. تساوي طاقة تأين ذرّة الهدروجين في حالتها الأرضيّة وفق نموذج بور القيمة $13.6eV$. وقد شكّلت هذه النتيجة لنظرية بور إنجازاً كبيراً، إذ إنّ قياس طاقة تأيّن ذرّة الهدروجين كان قد أفضى إلى نفس القيمة $13.6eV$ في تلك الآونة.

تسمح المعادلتان (2.4) و (2.13) بحساب تواتر الفوتون الصادر لدى انتقال الإلكترون من مدارٍ خارجيّ إلى آخر داخليّ:

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{k_e e^2}{2a_0 h}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (2.15)$$

وبما أنّ الكميّة المقيسة تجريبيّاً هي طول موجة الفوتون الصادر، من المناسب استخدام العلاقة $c = f\lambda$، للتعبير عن طول موجة الفوتون الصادر بالعلاقة:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{k_e e^2}{2a_0 hc}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (2.16)$$

تتطابق العلاقة النظريّة السابقة بشكلٍ ملفتٍ جداً مع الشكل العام للعلاقات نصف التجريبيّة التي كان قد اكتشفها كلٌّ من بالمر وريدبرغ المعطاة بالمعادلة العامة:

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (2.17)$$

أي إنّ قيمة الثابت $k_e e^2/2a_0 hc$ تساوي قيمة ثابتة ريدبرغ المقيسة تجريبيّاً. وقد برهن بور بعد ذلك مباشرةً التوافق بين القيمتين بخطأ لا يتجاوز 1%، واعتبر عمله هذا بمثابة الإنجاز الأهمّ للنظريّة الجديدة لذرّة الهدروجين. وأبعد من ذلك، فقد فسّر بور السلاسل الطيفيّة لإصدار ذرّة الهدروجين في نموذجه على أنّها توافق انتقالاتٍ إلى حالاتٍ نهائية مختلفة محدّدة بالعدد الكمومي n_f. يُظهر الشكل 2.9 منشأ السلاسل الطيفيّة المعروفة لذرّة الهدروجين والانتقالات بين السويّات الطاقيّة الموافقة لها.

مثال 1. (a) أوجد طول موجة الإشعاع اللازم لإثارة إلكترون في ذرّة الهدروجين من حالته الدنيا $n=1$ إلى الحالة المثارة $n=7$ مباشرةً. (b) أوجد أطوال أمواج الإشعاعات الصادرة إذا عاد الإلكترون إلى حالته الدنيا فانتقل إلى المدارات $n=4$ ثم $n=3$ ثم $n=1$.

الحل. (a) لإثارة الإلكترون يجب أن يمتص إشعاعاً تساوي طاقته الفارق بين طاقتي المدارين المذكورين، الأول والسابع وحسب فرضية بور $hf = E_7 - E_1$ أي إنّ طول موجة هذا الإشعاع:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{hc}{E_7 - E_1}$$

وبالتعويض في العلاقة (2.14) نحسب كلاً من E_1 و E_7، ومن ثمّ نحصل على قيمة الطول الموجي. يمكن الحصول على النتيجة أيضاً بشكل مباشر من العلاقة (2.17):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{7^2}\right) = 1.097\times10^7\left(1 - \frac{1}{49}\right) = 1.075\times10^7 m^{-1}$$

ومِن ثَمَّ يكون الطول الموجي للشعاع اللازم $\lambda = 93.06nm$ وهو يقع في المجال فوق البنفسجي.

(b) عند انتقال الإلكترون بين المدارات المذكورة يصدر ثلاثة فوتونات تساوي طاقة كل منها الفارق بين الطاقتين الابتدائية والنهائية في كل حالة. وباستعمال العلاقة (2.2) يمكن أن نحسب الأطوال الموجية للخطوط الطيفية الصادرة:

$$\frac{1}{\lambda_1} = 1.097\times10^7(\frac{1}{4^2}-\frac{1}{7^2}) = 46.17\times10^4 m^{-1}$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = 1.097\times10^7(\frac{1}{3^2}-\frac{1}{4^2}) = 53.33\times10^4 m^{-1}$$

$$\frac{1}{\lambda_3} = 1.097\times10^7(\frac{1}{1^2}-\frac{1}{3^2}) = 975.1\times10^4 m^{-1}$$

فالأوّل هو أحد خطوط سلسلة براكت وطول موجته $\lambda_1 = 2166nm$ والثاني هو أحد خطوط سلسلة باشن وطول موجته $\lambda_2 = 1875nm$، وهذان الإشعاعان يقعان في المجال تحت الأحمر. والثالث هو أحد خطوط سلسلة ليمان وطول موجته $\lambda_3 = 102.6\,nm$ ويقع في المجال فوق البنفسجي. ويمكن ملاحظة الخطوط في الشكل 2.9.

وقد طوّر بور نموذجه لذرّة الهدروجين كي يشمل ذرّاتٍ أخرى انتُزِع منها جميع إلكتروناتها عدا واحداً. تمتلك هذه الذرّات نفس بنية ذرّة الهدروجين إلا أنّ الشحنة النوويّة فيها أكبر. في تلك الأونة اعتقد العلماء أنّ العناصر المؤيّنة مثل He^+ وَ Li^{2+} وَ Be^{3+} متوافرةٌ في الغلاف الجويّ الحارّ للنجوم حيث تسمح التصادمات الذرّيّة المتكرّرة بانتزاع إلكترونٍ أو أكثر من هذه العناصر. وقد برهن بور أنّ العديد من خطوط الإصدار التي اكتشفت تجريبياً في طيف الشمس أو نجومٍ أخرى لا يمكن أن تُعزى للهدروجين، وأنّه يمكن التنبّؤ وفق نظريّته بأنّها تعود إلى ذرّة الهليوم المؤيّنة مرّةً واحدةً. يُطلق عموماً على عدد البروتونات في النواة الذرّيّة اسم العدد الذرّي للعنصر ويُرمز له Z. تعطي نظريّة بور من أجل إلكترونٍ وحيدٍ على مداره حول نواة محدّدة شحنتها $+Ze$ عبارة نصف قطر المدار بالعلاقة:

$$r_n = (n^2)\frac{a_0}{Z} \tag{2.18}$$

وطاقة الذرّة بالعلاقة:

$$E_n = -\frac{k_e e^2}{2a_0}\left(\frac{Z^2}{n^2}\right) \qquad n = 1,2,3,...... \tag{2.19}$$

بالرغم من أنّ نموذج بور لذرّة الهدروجين شكّل انتصاراً في توافقه الملفت مع بعض النتائج التجريبيّة، إلّا أنّه عانى بعض الصعوبات. وقد ظهرت مؤشّرات لضرورة تطوير هذا النموذج عندما بدأت تقنيّات القياسات الطيفيّة تتطوّر بشكلٍ ملحوظ. ساعدت هذه التقنيّات على فحص خطوط طيف الإصدار لذرّة الهدروجين بدقّةٍ كبيرة، وبيّنت أنّ العديد من خطوط سلسلة بالمر وغيرها من السلاسل الطيفيّة عبارةٌ عن

مجموعة من الخطوط الطيفيّة متقاربة كثيراً فيما بينها، وليست خطوطاً منفردة كما كان يُعتقد آنذاك. وأبعد من ذلك فقد أثبتت التجارب أنّه في بعض الحالات تتشطر الخطوط المنفردة في طيف الإصدار عندما تُوضع الذرّات في منطقةٍ يسودها حقلٌ مغنطيسي شديد. وقد بذل العلماء جهوداً كبيرةً لشرح هذه الظواهر التي لم تلق تفسيراً مقنعاً في نموذج بور، ممّا دفع في نهاية المطاف إلى التخلّي عن هذه النظريّة لصالح نظريّة بديلة وهي النظرية الكموميّة.

2.3. النموذج الكموميّ لذرّة الهدروجين

في الفقرة السابقة شرحنا كيف يرى بور الإلكترون في نموذجه جسيماً يدور حول البروتون في ذرّة الهدروجين، دون أن يصدر أيّ إشعاعٍ في حالته الأرضيّة، وكيف أنّ سويّات الطاقة المسموحة لذرّة الهدروجين مكمّاة. يتضمّن نموذج بور مفاهيم تقليديّة وكموميّة بآنٍ معاً. ومع أنّ هذا النموذج قد برهن عن توافقٍ ممتاز مع بعض النتائج التجريبيّة، لم يتمكن من شرح بعضها الآخر. وقد تمّ تذليل كافّة الصعوبات في نموذج بور بالانتقال إلى النموذج الكموميّ الكامل الذي يعتمد على حلول معادلة شرودنغر لتوصيف ذرّة الهدروجين. نحصل على هذه المعادلة بالانتقال إلى البحث عن تابع احتمالي هو التابع الموجي، يحقق معادلة تفاضلية جزئية تشبه معادلة الانتشار للأمواج المادية، بجعل الاندفاعات الخطية تعمل عمل مؤثرات، أما إحداثيات الموقع فتعامل معاملة مضاريب.

على سبيل المثال، لحل مسألة ذرّة الهدروجين كمومياً، يتم تعويض تابع الطاقة الكامنة المناسب للجملة (إلكترون – بروتون) في معادلة شرودنغر، وتطبيق شروط حدّيّة مناسبة للوصول إلى الحلول. يُعبّر تابع الطاقة الكامنة لذرّة الهدروجين عن التأثير الكهربائيّ المتبادل بين الإلكترون والبروتون، ويُكتب على الشكل:

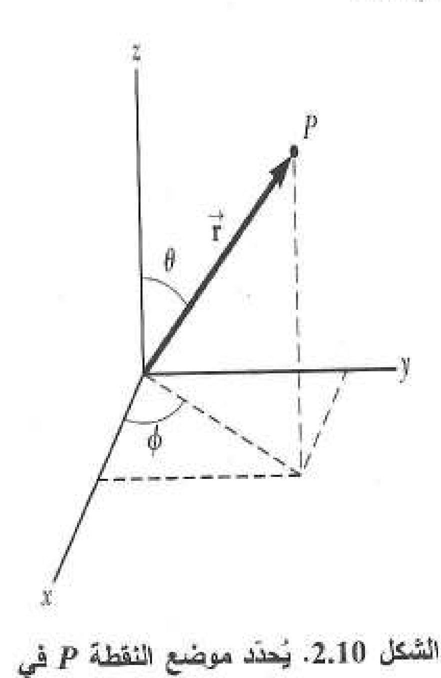
$$U(r) = -k_e \frac{e^2}{r} \qquad (2.20)$$

حيث k_e ثابت كولون الكهربائيّ، وَ r هي المسافة القطريّة بين الإلكترون وَالبروتون الذي نعتبره موجوداً في الموضع $(r=0)$.

تُعدّ مسألة ذرّة الهدروجين، من وجهة نظر النظريّة الكموميّة، معقّدةً إلى حدٍّ ما وذلك يعود إلى سببين: أوّلهما أنّ الذرّة ثلاثيّة الأبعاد، وثانيهما أنّ كمون التأثير المتبادل بين الإلكترون والبروتون متغيّرٌ مع المسافة القطريّة وليس ثابتاً. تُكتب معادلة شرودنغر المستقلّة عن الزمن وثلاثيّة الأبعاد بالإحداثيّات الديكارتيّة على الشكل:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right)+U\psi=E\psi \qquad (2.21)$$

إلّا أنّه، وبالنظر إلى طبيعة الكمون المركزيّ في حالة ذرّة الهدروجين، فإنّ تحويل الإحداثيّات الديكارتيّة إلى إحداثيّات كرويّة يُسهّل حلّ معادلة شرودنغر كثيراً في هذه المسألة. يحدّد موضع نقطة P بالإحداثيات الكرويّة باستخدام ثلاثة متحوّلات r وَ θ وَ ϕ، حيث r هي المسافة القطريّة بين المبدأ والنقطة، ولدينا العلاقة $r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$. ومن أجل النقطة الممثّلة لنهاية شعاع الموضع $\vec{r}$ كما في الشكل 2.10، تُمثّل الإحداثيّة θ الزاوية بين هذا الشعاع والمحور oz. وبإسقاط شعاع الموضع $\vec{r}$ على المستوي xy، تُحدّد الإحداثيّة ϕ بالزاوية بين مسقط شعاع الموضع والمحور ox.



الشكل 2.10. يُحدّد موضع النقطة P في الفضاء بواسطة شعاع الموضع $\vec{r}$. مركّبات شعاع الموضع بالإحداثيّات الديكارتيّة هي x وَ y وَ z. وفي الإحداثيات الكرويّة، r وهي المسافة بين المبدأ والنقطة P، والزاوية θ بين شعاع الموضع $\vec{r}$ والمحور oz، والزاوية ϕ بين مسقط شعاع الموضع $\vec{r}$ على المستوي xy والمحور ox.

كما يكتب التابع الموجي $\psi(r,\theta,\phi)$ الممثّل لحلول معادلة شرودنغر بالإحداثيّات الكرويّة بعد فصلها، على شكل جداءٍ لثلاثة توابع يظهر في كلٍّ منها متحوّلٌ واحدٌ فقط:

$$\psi(r,\theta,\phi)=R(r)\,f(\theta)\,g(\phi) \qquad (2.22)$$

وبهذه الطريقة، يمكن تحويل معادلة شرودنغر التي هي في الأصل معادلةٌ تفاضليّةٌ بمشتقّاتٍ جزئيّةٍ ثلاثيّةِ البعد إلى ثلاث معادلات تفاضليّة عاديّة، واحدة من أجل $R(r)$، وواحدة من أجل $f(\theta)$، وواحدة من أجل $g(\phi)$. تخضع هذه التوابع الثلاثة لشروطٍ حدّيّة. ينبغي على التابع $R(r)$ مثلاً أن يبقى منتهياً من أجل $r\to 0$ وَ $r\to\infty$، إضافة إلى ذلك ينبغي أن تكون قيمة $g(\phi)$ مساوية قيمة $g(\phi+2\pi)$. يتعلّق تابع الطاقة الكامنة الكهربائيّة لجملة (الإلكترون – البروتون) بالإحداثيّة القطريّة فقط ولا يتعلّق بالإحداثيّتين الزاويّتين θ وَ ϕ، لهذا السبب تظهر الطاقة الكامنة في معادلة التابع القطريّ $R(r)$ فقط. وبالنتيجة، نجد أنّ المعادلتين الزاويّتين $f(\theta)$ وَ $g(\phi)$ مستقلّتان عن الجملة المدروسة، وتبقى حلولهما محقّقةً من أجل أيّة جملةٍ دورانيّةٍ.

ولدى تطبيق الشروط الحدّية على التوابع الثلاثة جميعها، تظهر ثلاثة أعداد كموميّة مختلفة من أجل الحالات المسموحة لذرّة الهدروجين، يرتبط كلُّ عدد منها بإحدى المعادلات التفاضليّة العاديّة الثلاث.

تأخذ الأعداد الكموميّة الثلاثة قيماً صحيحة حصراً وفقاً لشرط الدورية في g، وهي مرتبطةٌ بدرجات الحريّة الثلاث للفضاء ثلاثيّ البعد.

يسمى العدد الكموميّ الأوّل المرتبط بالتابع القطريّ $R(r)$ العدد الكموميّ الرئيسيّ ويُرمز له بالرمز n. تسمح التوابع الموجيّة الناتجة عن حلّ المعادلة التفاضليّة المتعلّقة بالتابع $R(r)$ بحساب احتمال وجود الإلكترون على مسافة قطريّة محدّدة r من النواة. في الفقرة الآتية ستتمّ مناقشة اثنين من هذه التوابع الموجيّة.

وبتطبيق الشروط الحدّية على الحلول القطريّة، نجد أنّ طاقات الحالات المسموحة لذرّة الهدروجين ترتبط بالعدد الصحيح n وفق العلاقة:

$$E_n = -\left(\frac{k_e e^2}{2a_0}\right)\frac{1}{n^2} = -\frac{13.606}{n^2} \qquad n = 1,2,3,..... \qquad (2.23)$$

تتوافق هذه النتيجة تماماً مع نظرية بور. إنّ هذا التوافق ملفتٌ للنظر لأنّ نظريّة بور نصف تقليديّة، وهذه النظريّة ذات المنشأ الكموميّ الصرف، تصلان إلى نفس النتيجة ابتداءً من فرضيّاتٍ ابتدائيّةٍ مختلفةٍ تماماً.

أما العدد الكموميّ الثاني المسمّى بالعدد الكموميّ المداريّ، والذي يُرمز له بالرمز l، فيأتي من المعادلة التفاضليّة المتعلّقة بالتابع $f(\theta)$، وهو مرتبطٌ بالاندفاع المداريّ الزاويّ للإلكترون.

ويظهر العدد الكموميّ المداريّ المغنطيسي m_l من المعادلة التفاضليّة للتابع $g(\phi)$.
إنّ l و m_l عددان صحيحان أيضاً، ويؤدّي تطبيق الشروط الحدّية على الأجزاء الثلاثة للتابع الموجيّ إلى علاقاتٍ مهمّةٍ بين الأعداد الكموميّة الثلاثة، ويضع حدوداً على قيمها:

- ✓ يأخذ العدد الكموميّ الرئيسيّ n قيماً صحيحة في المجال من 1 إلى ∞.
- ✓ يأخذ العدد الكموميّ المداريّ l قيماً صحيحة في المجال من 0 إلى $n-1$.
- ✓ يأخذ العدد الكموميّ المداريّ المغنطيسي m_l قيماً صحيحة في المجال من $-l$ إلى l.

إذا كان $n=1$ مثلاً فالقيمة المسموحة للعدد الكموميّ المداريّ هي $l=0$، وللعدد الكموميّ المداريّ المغنطيسي هي $m_l=0$ فقط.

أمّا إذا كانت قيمة العدد الكموميّ الرئيسيّ $n=2$، تأخذ l القيمة 0 أو 1. من أجل $l=0$، يكون $m_l=0$، ومن أجل $l=1$ يمكن لـ m_l أن تأخذ القيم 1 أو 0 أو 1-. يلخّص الجدول 2.2 قواعد تحديد القيم المسموحة للأعداد الكموميّة الثلاثة.

الجدول 2.2. الأعداد الكموميّة الثلاثة لذرّة الهدروجين

العدد الكمومي	الرمز	القيم المسموحة	عدد الحالات المسموحة
n	العدد الكموميّ الرئيسيّ	1, 2, 3, ...	أي عدد
l	العدد الكموميّ المداريّ	0, 1, 2, ..., n-1	n
m_l	العدد الكموميّ المداريّ المغنطيسيّ	$-l,-l+1,-l+2,..0$ $,..l-2,l-1,l$	$2l+1$

لأسبابٍ تاريخيّةٍ، يُطلق على جميع الحالات التي تمتلك نفس العدد الكموميّ الرئيسيّ n اسم طبقة. تُرمّز الطبقات المتتالية بالحروف $K,L,M,....$، وهي توافق القيم المتتالية $n=1,2,3,...$. وبنفس الطريقة، تسمّى الحالات التي تمتلك نفس العددين الكموميّين n وَ l بالطبقة الجزئيّة. تستخدم الحروف $s,p,d,f,g,h,....$ للدلالة على الطبقات الجزئيّة المقابلة للقيم $l=0,1,2,3,....$. تمتلك الحالة ذات الرمز $3p$، مثلاً، الأعداد الكمومية $n=3$ وَ $l=1$، أما الحالة $2s$ فهي توافق $n=2$ وَ $l=0$. يلخّص الجدولان 2.3 وَ 2.4 التسميات والرموز المستخدمة للتعبير عن الحالات المسموحة.

الجدول 2.3. ترميز الطبقات الذرّيّة — الجدول 2.4. ترميز الطبقات الذرّيّة الجزئيّة

n	رمز الطبقة الذرّيّة	l	رمز الطبقة الذرّيّة الجزئيّة
1	K	0	s
2	L	1	p
3	M	2	d
4	N	3	f
5	O	4	g
6	P	5	h

أما الحالات التي لا تتوافق مع الحدود المعرّفة على الأعداد الكموميّة فهي غير موجودة. الحالة $2d$، مثلاً، ينبغي أن توافق $n=2$ وَ $l=2$ غير موجودة لأنّ أعلى قيمة مسموحة لـ l هي $n-1$. لذلك، من أجل $n=2$، الحالتان $2s$ و $2p$ فقط، بينما لا يمكن وجود حالات مثل $2d$ أو $2f$، إلخ. ومن أجل $n=3$، الطبقات الجزئيّة المسموحة هي $3s$ وَ $3p$ وَ $3d$ فقط.

سؤال1: من أجل السويّة الطاقيّة الموافقة لـ $n=4$ لذرّة الهدروجين، ما عدد الطبقات الجزئيّة الممكنة؟

سؤال2: من أجل قيمة العدد الكموميّ الرئيسيّ $n=5$، ما عدد القيم المختلفة الممكنة لـ l، وما عدد القيم المختلفة الممكنة لـ m_l؟

2.4. التوابع الموجيّة لذرّة الهدروجين

نظراً لأنّ الطاقة الكامنة الكهربائيّة لذرّة الهدروجين تتعلّق فقط بالمسافة القطريّة r بين النواة والإلكترون، يمكن تمثيل بعض الحالات المسموحة لهذه الذرّة بتوابع موجيّة تتعلّق فقط بـ r. من أجل هذه التوابع يأخذ

الجزآن $f(\theta)$ وَ $g(\phi)$ من التابع الموجيّ قيماً ثابتة. إنّ أبسط تابعٍ موجيٍّ للهدروجين هو التابع الذي يوصَف الحالة $1s$، ويُرمز له بالرمز $\psi_{1s}(r)$:

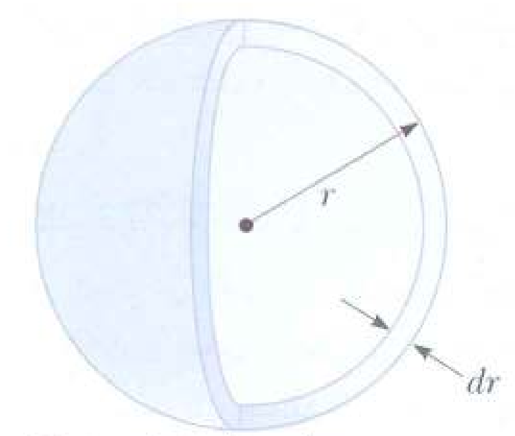
$$\psi_{1s}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_0^3}} e^{-r/a_0} \tag{2.24}$$

حيث a_0 نصف قطر بور. نلاحظ أنّ $\psi_{1s}(r)$ يحقّق الشروط المفروضة على التابع الموجيّ، حيث ينتهي إلى القيمة 0 من أجل $r \to \infty$، كما أنّه مستنظم، بمعنى أنه لو كاملنا هذا التابع على جميع قيم r الممكنة لكانت النتيجة مساوية للواحد. وأبعد من ذلك، بما أنّ $\psi_{1s}(r)$ يتعلّق فقط بالإحداثيّة r، فهو يحقّق التناظر الكرويّ. يتحقق التناظر الكرويّ في الحقيقة من أجل جميع الحالات من النوع s.

ويكون احتمال وجود جسيم في أيّة منطقةٍ في الفضاء يساوي تكامل كثافة الاحتمال $|\psi|^2$ للجسيم على هذه المنطقة. تُكتب كثافة الاحتمال للحالة على الشكل:

$$|\psi_{1s}|^2 = \left(\frac{1}{\pi a_0^3}\right) e^{-2r/a_0} \tag{2.25}$$

تُعبّر كثافة الاحتمال عن احتمال وجود الإلكترون في منطقة محدّدة من الفضاء، إذْ نعتبر أنّ النواة ثابتةٌ في الموضع $r=0$. ويُعطى احتمال وجود الإلكترون في هذه الحالة ضمن الحجم العنصري dV بالعبارة $|\psi|^2 dV$. من المفيد تعريف تابع كثافة الاحتمال القطريّة $P(r)$ في هذه الحالة، وهي تعبّر عن احتمال وجود الإلكترون في طبقة كرويّة الشكل نصف قطرها r وسماكتها dr من أجل واحدة الطول القطريّ (الشكل 2.11). بهذا التعريف يعطي الجداء $P(r)dr$، احتمال وجود الإلكترون ضمن الطبقة الكرويّة المعرّفة.



الشكل 2.11. طبقة كرويّة الشكل نصف قطرها r بسماكة رقيقة dr، حجمها $4\pi r^2 dr$

يساوي dV حجم الطبقة الكرويّة الرقيقة جداً سطحها الداخليّ $4\pi r^2$ مضروباً بسماكتها dr. يُكتب عندئذٍ احتمال وجود الإلكترون في هذه الطبقة على الشكل:

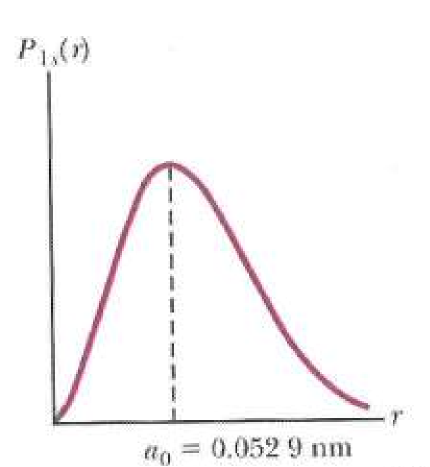
$$P(r)\,dr = |\psi|^2\,dV = |\psi|^2\,4\pi r^2\,dr \qquad (2.26)$$

أما تابع كثافة الاحتمال القطريّ من أجل حالة s فيأخذ الشكل:

$$P(r) = 4\pi r^2 |\psi|^2 \qquad (2.27)$$

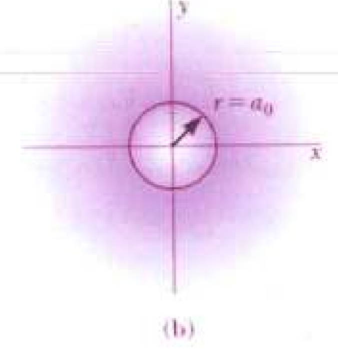
بتعويض المعادلة (2.25) في العلاقة (2.27) نجد عبارة تابع كثافة الاحتمال القطريّ لذرّة الهدروجين في الحالة الأرضيّة:

$$P_{1s}(r) = \left(\frac{4r^2}{a_0^3}\right) e^{-2r/a_0} \qquad (2.28)$$



الشكل 2.12. (a) احتمال وجود الإلكترون بدلالة المسافة التي تفصله عن النواة في ذرّة الهدروجين في الحالة الأساسيّة (الأرضية1s). يأخذ الاحتمال قيمة عظمى عند $r = a_0$.

يبيّن الشكل 2.12. (a) رسماً بيانياً للتابع $P_{1s}(r)$ بدلالة المسافة القطريّة r. تدلّ الذروة في المنحني على القيمة الأكثر احتمالاً للمسافة القطريّة من أجل الحالة $1s$. توافق الذروة القيمة a_0، أي نصف قطر بور، وهي المسافة القطريّة التي تفصل الإلكترون عن النواة في ذرّة الهدروجين عندما تكون في حالتها الأرضيّة وفق نموذج بور، وتُشكّل هذه النتيجة أيضاً توافقاً ملفتاً بين نظرية بور والنظرية الكموميّة.



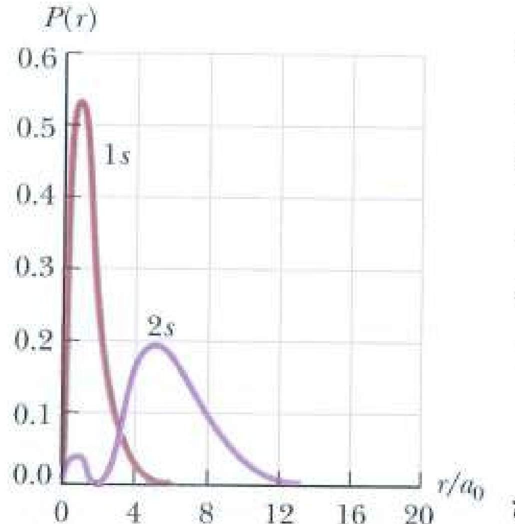
الشكل 2.12. (b) مقطع عرضي في المستوي xy لتوزّع شحنة الإلكترون الكرويّة في ذرّة الهدروجين في الحالة 1s. في هذا التمثيل، يدلّ اللون الغامق على الاحتمال الأعظمي، ويوافق نصف قطر بور

لا تمتلك الذرّة، وفق النظرية الكموميّة، حدوداً معرّفة بشكلٍ واضح، كما هو الحال في نظرية بور. بل يقترح التوزّع الاحتمالي لاحتمال وجود الإلكترون الممثّل بالشكل2.12. (b) أنّه يمكن اعتبار شحنة الإلكترون ممتدّة على منطقة من الفضاء، يُطلق عليها عادةً اسم الغمامة الإلكترونية. يبيّن الشكل كثافة الاحتمال الإلكترونية في ذرّة الهدروجين في الحالة $1s$ بدلالة الموضع في المستوي xy. تشير درجة عتمة اللون الأزرق في الشكل على قيمة كثافة الاحتمال. يبدو الجزء الأكثر عتمةً في التوزّع عند القيمة $r = a_0$، الموافقة للقيمة الأكثر احتمالاً للمسافة القطريّة r التي تفصل الإلكترون عن النواة.

أمّا التابع الموجيّ التالي من ناحية بساطة الشكل، لذرّة الهدروجين فهو يوافق الحالة $2s$ أي $(n = 2, l = 0)$. يأخذ التابع الشكل المستنظم:

$$\psi_{2s}(r) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}}\left(\frac{1}{a_0}\right)^{3/2}\left(2 - \frac{r}{a_0}\right)e^{-r/2a_0} \qquad (2.29)$$

نلاحظ هنا أيضاً أنّ ψ_{2s} يتعلّق فقط بالإحداثيّة r، وأنّه متناظر كروياً. تساوي طاقة الحالة $2s$ القيمة $E_2 = -(13.606/4)eV = -3.401eV$. تمثّل E_2 سويّة الطاقة للحالة المثارة الأولى لذرّة الهدروجين.



الشكل 2.13. تابع كثافة الاحتمال القطري بدلالة r/a_0 للحالتين 1s و 2s لذرّة الهدروجين

يبيّن الشكل 2.13 مقارنة بين تابع كثافة الاحتمال القطريّ للحالة $2s$ والحالة $1s$. يُظهر التابع P_{2s} ذروتين. في هذه الحالة، توافق القيمة الأكثر احتمالاً للمسافة القطريّة r تلك المقابلة للقيمة العظمى لـ P_{2s}، أي $(r \approx 5a_0)$. أي إنّ إلكتروناً في الحالة $2s$ سيكون وسطيّاً أبعد بكثير عن النواة من إلكترون في الحالة $1s$.

2.5. الدلالة الفيزيائية للأعداد الكمومية

يحدّد العدد الكمومي الرئيسيّ n لحالةٍ محدّدة في ذرّة الهدروجين طاقة الذرّة وفق العلاقة (2.14).

وسنشرح فيما يلي الدلالة الفيزيائيّة للأعداد الكموميّة الأخرى اعتماداً على أفكار مستمدة من الفيزياء التقليدية.

2.5.1. العدد الكمومي المداري l

لنعد قليلاً إلى نموذج بور لذرّة الهدروجين. إذا كان الإلكترون يتحرّك على مسارٍ دائريّ بنصف قطر r، تساوي طويلة الاندفاع الزاويّ له بالنسبة لمركز المسار القيمة $L = m_e vr$. ويُحدّد اتّجاه $\vec{L}$ بحيث يكون عمودياً على مستوي المسار، باستخدام قاعدة اليد اليمنى. وفق الميكانيك التقليدي، يمكن أن تأخذ طويلة الاندفاع الزاويّ أيّة قيمة. في نموذج بور لذرّة الهدروجين، افترض بور قيماً محدّدة لطويلة الاندفاع الزاويّ، وهي مضاعفات ثابت بلانك المختزل $\hbar$، أي أنّ L تحقّق العلاقة $L = n\hbar$، حيث n عدد صحيح. وقد تبيّن فيما بعد أنّ هذا النموذج ينبغي تعديله لأنّه يتنبّأ، بشكلٍ خاطئ، بأنّ طويلة الاندفاع الزاويّ لذرّة الهدروجين في حالتها الأساسيّة تساوي $L = 1\hbar$. وأكثر من ذلك، لو أخذنا في نموذج بور $L = 0$، ينبغي تمثيل الإلكترون في هذه الحالة بجسيمٍ يتحرّك بحركةٍ اهتزازيّة على طول خطٍّ مستقيم يعبر النواة، وهي صورة غير مقبولة فيزيائيّاً للإلكترون.

تمّ تجاوز هذه التناقضات جميعها في النموذج الكموميّ لذرّة الهدروجين، حيث يقتضي هذا النموذج التخلّي عن تمثيل الإلكترون كجسيمٍ يتحرّك على مسارٍ دائريّ محدّد. إلّا أنّه، بالرّغم من غياب هذا

التمثيل، تمتلك الذرّة اندفاعاً مدارياً زاوياً. ووفق ميكانيك الكمّ، يمكن لذرّة في حالةٍ محدّدة بالعدد الكموميّ الرئيسيّ n أن تمتلك قيماً متقطّعة لطويلة الاندفاع المداريّ الزاويّ تُعطى بالعلاقة:

$$L = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar \qquad l = 0,1,2,......,n-1 \tag{2.30}$$

وبإعطاء القيم المسموحة للعدد الكموميّ المداريّ l، نجد أنّ $L=0$ (الموافقة للقيمة $l=0$) هي قيمةٌ مقبولةٌ لطويلة الاندفاع الزاويّ. وتدلّ القيمة $L=0$ لطويلة الاندفاع الزاويّ في ميكانيك الكمّ على أنّ الغمامة الإلكترونية في هذه الحالة متناظرةٌ كروياً، ولا تمتلك أي محور تناظر.

2.5.2. العدد الكموميّ المداريّ المغنطيسيّ m_l

إنّ الاندفاع الزاويّ مقدارٌ شعاعيٌّ، وينبغي تحديد اتجاهه. لنعد إلى العزم المغنطيسيّ لحلقة تيّار، المعرّف كلاسيكياً بالمقدار $\vec{\mu} = I\vec{A}$، حيث I شدّة التيّار المارّ في الحلقة، وَ $\vec{A}$ شعاعٌ عموديٌّ على مستوي الحلقة وتساوي طويلته قيمة سطح الحلقة. لو وُضعت حلقة التيّار في منطقةٍ يسود فيها حقلٌ مغنطيسيٌّ $\vec{B}$، لتفاعلت معها، ويمكن التعبير عن طاقة الجملة (حلقة التيّار – الحقل المغنطيسيّ) بالعلاقة $U_B = -\vec{\mu}\cdot\vec{B}$. أي إنّ طاقة الجملة ترتبط باتّجاه الحقل المغنطيسيّ المطبّق، ووفق الميكانيك التقليديّ يمكن لهذه الطاقة أن تأخذ أيّة قيمةٍ بين $-\mu B$ وَ $+\mu B$.

يُمثّل الإلكترون على مساره الدائريّ في نظريّة بور حلقة التيّار. في النظرية الكموميّة تمّ التخلّي عن المسار الدائريّ المحدّد، إلّا أنّ الذرّة بقيت تمتلك اندفاعاً مدارياً زاوياً. لهذا السبب، يمكن الحديث عن "اتّجاه" دورانٍ للإلكترون حول النواة، ومن ثَمّ عن وجود عزمٍ مغنطيسيّ ناتجٍ عن هذا الدوران.

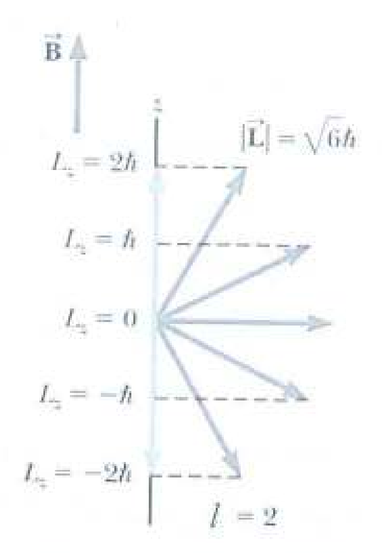
لُوحظ انشطار خطوط الإصدار الأحاديّة لبعض الذرّات إلى مجموعاتٍ من ثلاثة خطوطٍ طيفيّةٍ متقاربةٍ لدى وضع هذه الذرّات في منطقة يسودها حقلٌ مغنطيسيّ. لنفترض أن ذرّة الهدروجين وضِعَت في منطقة يسودها حقلٌ مغنطيسيّ $\vec{B}$ وفق اتّجاه المحور z. بحسب ميكانيك الكمّ، يوجد اتّجاهات محدّدة مسموحة لشعاع العزم المغنطيسيّ للذرّة $\vec{\mu}$ بالنسبة للحقل المغنطيسيّ الخارجيّ $\vec{B}$. تختلف هذه الصورة جدّاً عن الفيزياء التقليديّة التي تسمح لـ $\vec{\mu}$ بأخذ كلّ الاتجاهات في الفضاء.

يرتبط العزم المغنطيسي $\vec{\mu}$ للذرّة بشعاع الاندفاع الزاويّ $\vec{L}$، وتنسحب الاتّجاهات المحدّدة لـ $\vec{\mu}$ على اتّجاه شعاع الاندفاع الزاويّ $\vec{L}$ ليصبح مكمّى أيضاً. تعني تكمية اتّجاه $\vec{L}$، أنّ L_z (مركّبة $\vec{L}$ وفق المحور z حامل الحقل المغنطيسيّ) يمكنها أن تمتلك قيماً محدّدة فقط. يُعيّن العدد الكموميّ المداريّ المغنطيسيّ m_l القيم المسموحة للمركّبة L_z، وقد أعطي هذه التسمية بناء على هذا، وفق العلاقة:

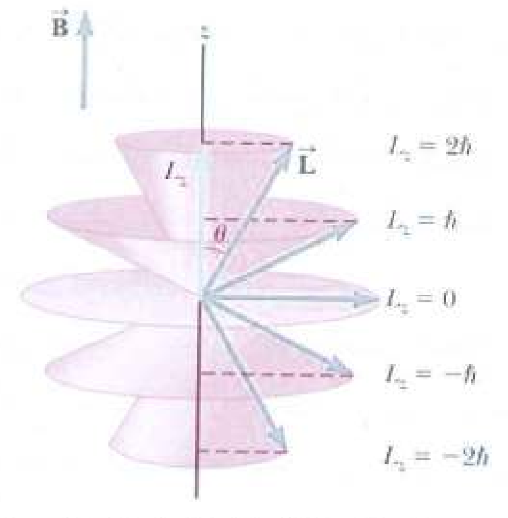
$$L_z = m_l\,\hbar \tag{2.31}$$

تُعرف تكمية الاتّجاهات الممكنة لشعاع الاندفاع الزاويّ بالنسبة لحقلٍ مغنطيسيّ خارجيّ باسم تكمية الفضاء.

لنلق نظرةً على قيم واتّجاهات $\vec{L}$ من أجل قيمةٍ معطاةٍ للعدد الكموميّ المداريّ l. يأخذ العدد الكموميّ m_l القيم بين $-l$ وَ $+l$. من أجل $l=0$، يكون لدينا $L=0$، والقيمة الوحيدة المسموحة لـ m_l هي $m_l=0$، ومِن ثَمّ $L_z=0$. من أجل $l=1$، تساوي طويلة الاندفاع الزاويّ $L=\sqrt{2}\hbar$. والقيم المسموحة للعدد الكموميّ m_l هي -1 وَ 0 وَ $+1$، ومِن ثَمّ تأخذ المركّبة L_z إحدى القيم $-\hbar$، وَ 0، وَ $+\hbar$. ومن أجل $l=2$، تساوي طويلة الاندفاع الزاويّ $L=\sqrt{6}\hbar$. وتصبح القيم المسموحة للعدد الكموميّ m_l هي -2، -1، 0، $+1$، $+2$، ومِن ثَمّ تأخذ المركّبة L_z إحدى القيم $-2\hbar$، $-\hbar$، 0، $+\hbar$، $+2\hbar$، وهكذا من أجل قيم متزايدة لـ l.



(a)المساقط المسموحة على المحور z لشعاع الاندفاع الزاويّ المداريّ $\vec{L}$ هي مضاعفات صحيحة لـ $\hbar$.



(b)بما أنّ مركّبتي الاندفاع الزاويّ المداريّ على المحورين x وَ y، غير مكمّاتين، يقع الشعاع $\vec{L}$ على سطح مخروط

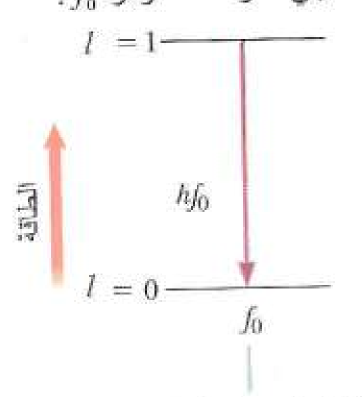
الشكل 2.14 نموذج شعاعيّ من أجل الحالة $l=2$.

يبيّن الشكل 2.14 نموذجاً شعاعياً يشرح تكمية الفضاء من أجل الحالة $l=2$. نلاحظ أنّ الشعاع $\vec{L}$ لا يمكن أبداً أن يوازي الحقل المغنطيسيّ الخارجيّ $\vec{B}$، لأنّ أعظم قيمةٍ للمركّبة L_z هي $l\hbar$، وهي أقلّ من طويلة الاندفاعَ الزاويّ $L=\sqrt{l(l+1)}\hbar$. ويُسمح لشعاع الاندفاع الزاوي $\vec{L}$ أن يُعامد الحقل المغنطيسيّ، وتقابل هذه الحالة $L_z=0$ وَ $l=0$.

لا يشير الشعاع $\vec{L}$ إلى اتّجاهٍ واحد محدّد في الفضاء. لو كان الشعاع $\vec{L}$ محدّداً بشكلٍ كاملٍ لأمكن تعيين مركّباته الثلاث L_x, L_y, L_z، وهذا يتناقض مع مبدأ الشكّ. كيف يمكن لطويلة هذا الشعاع ومركّبته L_z وفق المحور z أن تكونا محدّدتين بشكلٍ كامل، دون تحديد المركّبتين الباقيتين؟ للإجابة عن هذا السؤال، ينبغي أن يقع الشعاع $\vec{L}$ على سطح مخروطٍ يصنع زاوية θ مع محور المخروط z كما يبيّن الشكل 2.14. من الشكل نجد أن قيم الزاوية θ مكمّاة أيضاً، وتُحدّد هذه القيم بالعلاقة:

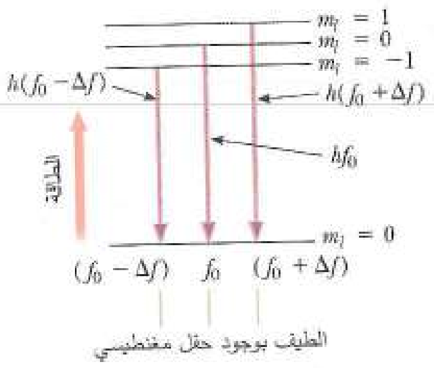
$$\cos\theta = \frac{L_z}{L} = \frac{m_l}{\sqrt{l(l+1)}} \qquad (2.32)$$

في غياب الحقل المغنطيسي $\vec{B}=\vec{0}$، يكون للحالة المثارة طاقة وحيدة، ويُشاهد خطّ طيفيّ منفرد عند التواتر f_0.



الطيف في غياب الحقل المغنطيسي

تتفكّك الحالات المثارة الثلاث بوجود حقل مغنطيسي إلى الحالة الأرضيّة، وتوافق التفكّكات ثلاث طاقات مختلفة، وتُشاهد ثلاثة خطوط طيفيّة منفصلة.



الطيف بوجود حقل مغنطيسي

الشكل 2.15. مفعول زيمان. (a) سويّات الطاقة من أجل الحالات المثارة الأولى لذرّة الهدروجين. (b) لدى وضع الذرّة في منطقة يسودها حقلٌ مغنطيسي $\vec{B}$، تنشطر الحالة الموافقة لـ $l=1$، إلى ثلاث حالات، مُعطيةً ثلاثة خطوط إصدار طيفيّة عند التواترات f_0 وَ $f_0+\Delta f$ وَ $f_0-\Delta f$، حيث Δf هو الإزاحة في تواتر الإصدار الناتجة عن الحقل المغنطيسيّ.

إذا وُضعت الذرّة في منطقة يسودها حقلٌ مغنطيسي، تُضاف قيمة الطاقة $U_B=-\vec{\mu}\cdot\vec{B}$ إلى طاقة الجملة (ذرة – حقل خارجي) الأصليّة. وبما أنّ اتّجاهات العزم المغنطيسي $\vec{\mu}$ مكمّاة، يكون لدينا قيم متقطّعة للطاقة الكلّية للجملة، تقابل قيماً محدّدة للعدد الكموميّ m_l. يبيّن الشكل2.15 (a) انتقالاً بين سويّتين ذرّيتين بغياب الحقل المغنطيسي. وعندما يُطبّق حقلٌ مغنطيسيّ، كما في الشكل 2.15 (b)، تنشطر السويّة العلويّة $l=1$ إلى ثلاث سويّاتٍ توافق اتّجاهاتٍ مختلفة لـ $\vec{\mu}$. وهكذا يصبح لدينا في حالة تطبيق الحقل المغنطيسيّ الخارجيّ ثلاثة انتقالاتٍ ممكنةٍ من الطبقة الذرّية الجزئيّة الموافقة لـ $l=1$ إلى الطبقة الذرّية الجزئيّة الموافقة لـ $l=0$. لذلك، وفي تجمّع للذرّات، تتواجد ذرّات في الحالات الثلاث الموافقة لاتّجاهات مختلفة لـ $\vec{\mu}$ جميعها، وينشطر مِنْ ثَمَّ الخطّ الطيفيّ المنفرد إلى ثلاثة خطوطٍ طيفيّةٍ. يُطلق على هذه الظاهرة اسم مفعول زيمان.

يمكن استخدام مفعول زيمان لقياس الحقول المغنطيسيّة خارج الكرة الأرضيّة. يمكن استخدام انشطار الخطوط الطيفيّة لذرّات الهدروجين على سطح الشمس لتقدير شدّة الحقل المغنطيسيّ في ذلك الموضع. يُعدّ مفعول زيمان واحداً من ظواهر عديدة لا يمكن شرحها وفق نظرية بور، وتشرح بشكلٍ ناجحٍ في النموذج الكموميّ للذرّة.

2.5.3. العدد الكموميّ المغنطيسيّ السبينيّ m_s

رأينا أنّ الأعداد الكموميّة n وَ l وَ m_l تنتج عن تطبيق الشروط الحدّية على حلول معادلة شرودنغر، وأنّ لكلٍّ منها دلالةً فيزيائيّةً.

غير أنه وجد تجريبياً بنية إضافية للخطوط الطيفية تقود إلى افتراض وجود سبين الإلكترون، وهي ميزةٌ لا تنتج عن معادلة شرودنغر.

من أجل قيمة العدد الكمومي الرئيسيّ $n=2$، نحصل على أربع حالاتٍ كموميّة مقابلةٍ لثنائيّات مختلفة من الأعداد الكموميّة l وَ m_l. إلّا أنّه في الحقيقة يوجد ثماني حالات يمكن تمييزها بالقياس التجريبيّ. يمكن تفسير الحالات الأربع الإضافيّة بإضافة عددٍ كموميّ رابعٍ لكلّ حالة، وهو العدد الكموميّ المغنطيسي السبينيّ m_s.

ظهرت الحاجة إلى هذا العدد الكموميّ الجديد لتفسير مشاهدات غريبة في أطياف بعض الغازات، مثل بخار الصوديوم. لدى القيام بفحصٍ دقيقٍ لخطّ إصدارٍ رئيسيّ معروف في طيف الصوديوم، يبدو هذا الخطّ، في الحقيقة، عبارةً عن خطّين متقاربين يُطلق عليهما اسم ثنائيّة إصدار. توافق الأطوال الموجيّة للثنائيّة القيمتين $589.0nm$ وَ $589.6nm$ في المجال الأصفر من الطيف الكهرطيسيّ. عندما تمّ اكتشاف هذه الثنائيّة تجريبياً أوّلَ مرّة عام 1925، لم يكن بالإمكان تفسيرها باستخدام النظريّة الذرّيّة آنذاك. ولحلّ هذه المعضلة، اقترح كلٌّ من ساموبل غودسميت وجورج أولنبيك، ومن بعدهما ولفغانغ باولي العدد الكموميّ السبينيّ.

من السهولة بمكان، وبهدف شرح هذا العدد الكموميّ الجديد، أن نتخيّل أنّ الإلكترون يدور حول محوره أثناء حركته على مداره حول النواة. توجد كما هو مبيّن في الشكل جهتان لدوران الإلكترون حول نفسه، ومِن ثَمّ جهتان لسبينه. إمّا أن يكون سبينه نحو الأعلى كما في الشكل 2.16 (a)، وإمّا نحو الأسفل كما في الشكل 2.16 (b). وفي حال وجود حقل مغنطيسيّ خارجيّ، تختلف طاقة التأثير المتبادل بين الحقل والإلكترون بحسب اتجاه سبينه. يفسّر هذا الاختلاف الثنائيّة في طيف بخار الصوديوم.

(a)

(b)

الشكل 2.16. يمكن أن يكون سبين الإلكترون إمّا (a) علويّ، وإمّا (b) سفليّ بالنسبة لاتّجاه محدّد كالمحور z. كما في حالة الاندفاع الزاويّ المداريّ، مركّبتا شعاع الاندفاع الزاويّ السبينيّ وفق المحورين x وَ y غير مكمّمتين.

إنّ التوصيف التقليديّ لسبين الإلكترون كنتيجةٍ لدورانه حول محوره غير صحيح. تدلّ النظريّات الحديثة على أنّ الإلكترون جسيم أوّليّ ولا بنية داخلية له. لهذا السبب لا يمكن استخدام نموذج الجسم الصلب لتفسير دوران الإلكترون حول محوره وامتلاكه نتيجة هذا الدوران لسبين. ومع وجود هذه الصعوبة على مستوى المفاهيم، تقدّم جميع التجارب الحديثة براهين واضحة على فكرة امتلاك الإلكترون لاندفاعٍ زاويٍّ ذاتيّ، يمكن توصيفه بالعدد الكموميّ المغنطيسي السبينيّ. وقد بيّن بول ديراك فيما بعد أنّ منشأ العدد الكموميّ الرابع هو الخواص النسبويّة للإلكترون.

أنجز الفيزيائيّان أوتو ستيرن ووالتر غيرلاش عام 1921، تجربةً برهنت على تكمية الفضاء. في هذه التجربة وجّه العالمان حزمة من ذرّات الفضّة لتعبر منطقةً يسود فيها حقلٌ مغنطيسيّ غير منتظم، فانشطرت الحزمة إلى مركّبتين منفصلتين. وقد أعاد العالمان إجراء التجربة باستخدام ذرّات أخرى، وفي كلّ مرّة كانت الحزمة تنشطر إلى مركّبتين أو أكثر.



الشكل 2.17. التقنيّة التجريبيّة التي استخدمها العالمان ستيرن وغيرلاش للتحقق من تكمية الفضاء

من وجهة نظرٍ تقليدية، إذا كان المحور z هو المحور الموافق لعدم الانتظام الأعظميّ للحقل المغنطيسيّ $\vec{B}$، تكون بذلك محصّلة القوّة المغنطيسيّة على ذرّات الحزمة محمولة على المحور z وهي متناسبةٌ مع مركّبة العزم المغنطيسيّ $\vec{\mu}$ للذرّة وفق المحور z. تقليدياً، يمكن للشعاع $\vec{\mu}$ أن يأخذ أيّ اتّجاهٍ في الفضاء، وعليه فإنّ الحزمة، المنحرفة بتأثير القوّة المغنطيسيّة على ذرّاتها، ينبغي أن تمتدّ بشكلٍ مستمرٍّ على بقعةٍ من الفضاء. أمّا من وجهة نظرٍ كموميّة، فإنّ لحزمة الذرّات المنحرفة بسبب الحقل المغنطيسيّ عدداً صحيحاً من المركّبات المنفصلة، يرتبط مباشرةً بعدد المركّبات المتقطّعة لـ $\vec{\mu}$. إن انشطار الحزم الذرّية في تجربة ستيرن – غيرلاش، برهن بشكلٍ وصفيّ على الأقل تكمية الفضاء.

لنفترض، الآن، أنّ العزم المغنطيسيّ للذرّة ينتج عن اندفاعها المداريّ الزاويّ. بما أنّ μ_z يتناسب مع m_l، فإنّ القيم الممكنة لـ μ_z تساوي $2l+1$. وأبعد من ذلك، وبما أنّ l عددٌ صحيح فإنّ عدد قيم μ_z فرديّ. تتناقض هذه النتيجة مع مشاهدات العالمين غيرلاش وستيرن، إذْ أكّدا وجود مركّبتين (أي عدد زوجي) في حزمة ذرّات الفضّة المنحرفة في الحقل المغنطيسيّ. إذاً، إمّا نظرية الميكانيك الكموميّ غير صحيحة، وإمّا النموذج يحتاج إلى تعديل.

وقد كرّر فيبس وتايلور تجربة غيرلاش ستيرن عام 1927 باستخدام حزمة من ذرّات الهدروجين. تأتي أهمّية هذه التجربة كونها تستخدم ذرّة تحتوي إلكتروناً منفرداً في حالته الأساسيّة، وقد أعطت النظرية الكمومية تنبؤاتٍ على درجة من الموثوقيّة. لنتذكّر بأنّ من أجل ذرّة الهدروجين بحالتها الأساسيّة $l=0$، أي إنّ $m_l=0$. لهذا السبب، من غير المتوقّع أبداً أن تنحرف الحزمة بوجود الحقل المغنطيسيّ، لأنّ العزم المغنطيسي للذرّة معدوم. في تجربة فيبس وتايلور، ثبت أنّ الحزمة انشطرت أيضاً إلى مركّبتين بسبب الحقل المغنطيسيّ. بالاعتماد على هذه النتيجة، نستنتج أنه يوجد شيءٌ آخر غير حركة الإلكترون المداريّة، يسهم في العزم المغنطيسيّ لذرّة الهدروجين.

وقد كان العالمان غودسميت وأولنبيك في وقتٍ سابقٍ قد اقترحا أنّ للإلكترون اندفاعاً زاوياً ذاتياً، أو سبيناً، يُضاف إلى اندفاعه المداريّ الزاويّ. وبعباراتٍ أخرى، يتضمّن الاندفاع الزاويّ الكلّي للإلكترون في حالةٍ محدّدة مساهمتين، واحدة مداريّة $\vec{L}$، وأخرى ذاتيّة أو سبينيّة $\vec{S}$. وقد قد برهنت تجربة تايلور وفيبس فرضيّة العالمين غودسميت وأولينبيك.

في عام 1929، استخدم ديراك الشكل النسبويّ للطاقة الكلّيّة لجملة فيزيائيّة لحلّ المعادلة الموجيّة النسبويّة للإلكترون في بئرٍ كموميّ. وقد أثبت في حلّه الطبيعة الأساسيّة لسبين الإلكترون. أي إنّ السبين مثل الكتلة أو الشحنة الكهربائيّة ميزةٌ ذاتيّة للجسيم وغير مرتبطة بمحيطه. وأبعد من ذلك، بيّن ديراك أنّه يمكن توصيف السبين الإلكترونيّ بعدد كموميّ واحد s، يأخذ قيمة وحيدة $s=\frac{1}{2}$. لا يتغيّر الاندفاع الزاويّ الذاتيّ للإلكترون أبداً. تتناقض هذه النتيجة تماماً مع القوانين التقليديّة، التي تقول بأنّ الحركة الدورانيّة لشحنةٍ ما تتباطأ بوجود حقلٍ مغنطيسيّ بسبب القوّة المحرّكة الكهربائيّة الناتجة عن تغيّر الحقل وفق قانون فارادي. وإذا ذهبنا إلى أبعد من ذلك وافترضنا بأنّ الإلكترون عبارةٌ عن كرةٍ مشحونةٍ تدور حول ذاتها كلاسيكياً، فإنّ الجزء القريب من سطح هذه الكرة سيدور بسرعاتٍ قريبةٍ من سرعة الضوء. لهذا السبب، ينبغي ألّا نذهب بعيداً بتوصيف الإلكترون تقليدياً، والقبول أخيراً بأنّ سبين الإلكترون هو مقدار كموميّ صرف لا ينسجم مع أيّ وصفٍ تقليديّ بسيط للإلكترون.

بما أنّ للسبين شكل اندفاعٍ زاويّ، ينبغي أن يخضع لنفس القواعد التي يخضع لها الاندفاع الزاويّ المداريّ في النظريّة الكموميّة. ونكتب تبعاً لذلك طويلة الاندفاع الزاويّ السبينيّ $\vec{S}$ للإلكترون على الشكل:

$$S=\sqrt{s(s+1)}\,\hbar=\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar \qquad (2.33)$$

كما يُبدي الاندفاع الزاويّ السبينيّ $\vec{S}$، مثله مثل الاندفاع الزاويّ المداريّ $\vec{L}$، تكمية الفضاء. يمكن أن يكون لـ $\vec{S}$ اتّجاهان بالنسبة للمحور z، محدّدان بالعدد الكموميّ المغنطيسيّ السبينيّ $m_s=\pm\frac{1}{2}$.

وتحقّق مركّبة الاندفاع الزاويّ السبينيّ وفق المحور z العلاقة:

$$S_z=m_s\hbar=\pm\frac{1}{2}\hbar \qquad (2.34)$$

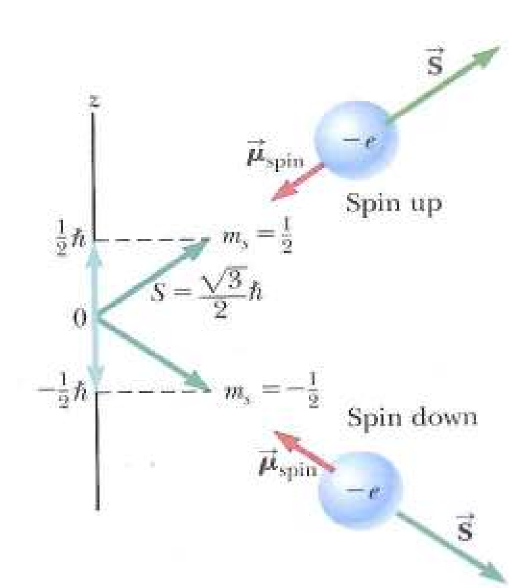
توافق القيمتان $\pm\hbar/2$ لـ S_z الاتجاهين الممكنين لـ $\vec{S}$، كما يبيّن الشكل 2.18. توافق القيمة $m_s=+\frac{1}{2}$، حالة السبين العُلويّ، بينما توافق القيمة $m_s=-\frac{1}{2}$، حالة السبين السُفليّ. من غير المسموح للاندفاع الزاويّ السبينيّ أن يوازي المحور z كما هو واضحٌ من العلاقتين (2.33) وَ(2.34).

بنفس الطريقة التي وجدنا بها القيم الممكنة للعدد الكموميّ المغنطيسيّ المداريّ m_l، نجد أنّ القيم الممكنة للعدد الكموميّ المغنطيسي السبينيّ m_s هي $2s+1$، ومن أجل $s=\frac{1}{2}$، نجد أنّ عدد هذه القيم يساوي 2. هاتان القيمتان الممكنتان لـ m_s، تفسّران انشطار الحزم الذرّيّة إلى مركّبتين في تجربتيّ ستيرن – غيرلاش، و فيببس – تايلور.

يرتبط العزم المغنطيسي السبينيّ للإلكترون باندفاعه الزاويّ السبينيّ وفق العلاقة:

$$\vec{\mu}_{spin}=-\frac{e}{m_e}\vec{S} \qquad (2.35)$$

حيث e هي الشحنة الإلكترونيّة، وَ m_e كتلة الإلكترون. وبما أنّ $S_z=\pm\frac{1}{2}\hbar$، يمكن أن تأخذ مركّبة العزم المغنطيسيّ السبينيّ وفق المحور z إحدى القيمتين:



الشكل 2.18. يبيّن الاندفاع الزاويّ السبينيّ $\vec{S}$ تكمية الفضاء. يبيّن هذا الشكل الاتّجاهين الممكنين لشعاع الاندفاع الزاويّ السبينيّ $\vec{S}$، والعزم المغنطيسي السبينيّ $\vec{\mu}_{spin}$ لجسيم بسبين $1/2$ مثل الإلكترون.

$$\vec{\mu}_{spin,z}=\pm\frac{e\hbar}{2m_e} \qquad (2.36)$$

يُطلق على الكمّيّة $e\hbar/2m_e$ اسم مغنطون بور، وهو يساوي $\mu_B=9.27\times10^{-24}\ J/T$.

يُفسّر الفيزيائيّون، اليوم، تجربتي ستيرن – غيرلاش، وفيببس – تايلور كالآتي: تنشأ العزوم المغنطيسيّة المشاهَدة لذرّات الفضّة والهدروجين عن الاندفاع الزاويّ السبينيّ حصراً، دون أيّة مساهمة للاندفاع الزاويّ المداريّ. في تجربة فيببس – تايلور، الإلكترون المنفرد في ذرّة الهدروجين يمتلك سبيناً مكمّى بحيث تكون مركّبته بوجود الحقل المغنطيسيّ وفق المحور z إمّا $+\frac{1}{2}\hbar$ أو $-\frac{1}{2}\hbar$، وهو ما يقابل $m_s=\pm\frac{1}{2}$. تنحرف الإلكترونات بسبين مساوٍ لـ $+\frac{1}{2}$ باتجاه الأسفل، بينما تنحرف الإلكترونات بسبين مساوٍ لـ $-\frac{1}{2}$ باتّجاه الأعلى. وفي تجربة ستيرن – غيرلاش، 46 إلكتروناً من أصل 47 لذرّة الفضّة يوجدون في طبقاتٍ جزئيّة مملوءة تماماً بثنائيّاتٍ من السبينات المتعاكسة. لهذا السبب، لا تسهم هذه الإلكترونات لا في الاندفاع الزاويّ المداريّ، ولا في الاندفاع الزاويّ السبينيّ لذرّة الفضّة. وينتج الاندفاع الزاويّ لهذه الذرّة حصراً من الإلكترون الـ 47. يوجد هذا الإلكترون في الطبقة الجزئيّة $5s$، لذلك لا توجد مساهمة للاندفاع الزاويّ المداريّ من أجل هذا الإلكترون. وبالنتيجة، تمتلك ذرّات الفضّة اندفاعاً زاويّاً ناتجاً فقط عن سبين هذا

الإلكترون المنفرد، وتتصرّف هذه الذرّات مِنْ ثَمّ كذرّات الهدروجين في تجربة فيبس – تايلور بوجود الحقل المغنطيسيّ الخارجيّ غير المنتظم.

قدّمت تجربة ستيرن – غيرلاش نتيجتين هامّتين. أوّلاً، أكّدت مفهوم تكمية الفضاء. وثانياً، أثبتت وجود اندفاع زاويّ سبينيّ تجريبياً، بالرّغم من أنّ هذه الخاصّيّة لم تكن معروفة من الناحية النظريّة، ولم يتمّ الحديث عنها إلّا بعد أربع سنوات من إجراء التجربة.

من أجل قيمة العدد الكموميّ الرئيسيّ $n=2$ في ذرّة الهدروجين، لدينا ثماني حالات كموميّة. يبيّن الجدول 2.5 الأعداد الكموميّة الموافقة للحالات الثماني.

الجدول 2.5. الأعداد الكموميّة من أجل الحالة $n=2$ للهدروجين

n	l	m_l	m_s	الطبقة الجزئيّة	الطبقة	عدد الحالات في الطبقة الجزئيّة
2	0	0	$+\frac{1}{2}$			
2	0	0	$-\frac{1}{2}$	$2s$	L	2
2	1	1	$+\frac{1}{2}$			
2	1	1	$-\frac{1}{2}$			
2	1	0	$+\frac{1}{2}$			
2	1	0	$-\frac{1}{2}$			
2	1	-1	$+\frac{1}{2}$	$2p$	L	6
2	1	-1	$-\frac{1}{2}$			

2.6. مبدأ الاستبعاد والجدول الدوري

وجدنا أنّ حالة ذرّة الهدروجين معرّفة بأربعة أعداد كموميّة: n,l,m_l,m_s. وكذلك يبدو أنّ عدد الحالات المتوافرة لذرّاتٍ أخرى يمكن التنبؤ بها باستخدام الأعداد الكموميّة الأربعة نفسها، مهما كان عدد إلكترونات هذه الذرّات.

في المناقشة اللاحقة للذرّات بعددٍ كبيرٍ من الإلكترونات، من الأسهل في الغالب ربط الأعداد الكموميّة بالإلكترونات في الذرّة. ويظهر هنا سؤال بديهيّ، ما عدد الإلكترونات التي يمكن أن توجد في حالةٍ كموميّةٍ محدّدة؟ أجاب باولي عن هذا السؤال المهم عام 1925، في مقولةٍ شهيرة باسم **مبدأ الاستبعاد:**

لا يمكن لإلكترونين أن يكونا في نفس الحالة الكموميّة، لهذا السبب لا يمكن أبداً لإلكترونين أن يمتلكا نفس مجموعة الأعداد الكموميّة الأربعة.

لو لم يكن هذا المبدأ محققاً، لأصدرت الذرّة طاقة بالإشعاع حتى يصبح كلّ إلكترون من إلكتروناتها في أدنى حالة طاقيّة ممكنة له، ومِنْ ثَمّ لتغيّرت الطبيعة الكيميائيّة للعناصر بشكلٍ كبير. وبالنتيجة لم تكن الطبيعة لتوجد كما نعرفها.

يمكننا، في الحقيقة، رؤية البنية الإلكترونيّة لذرّاتٍ معقّدة على أنها تتابعٌ لسويّاتٍ مملوءةٍ بإلكترونات ذات طاقاتٍ متزايدة. وكقاعدة عامة، يكون ترتيب ملء السويّات الجزئيّة في الذرّة كالآتي: لدى ملء سويّة جزئيّة ما، ينتقل الإلكترون إلى السويّة الجزئيّة غير المملوءة ذات الطاقة التالية الأخفض. يمكن فهم هذا السلوك للذرّة بقولنا أنّه لو كانت في الحالة الطاقيّة المتاحة ولكن غير الأخفض، لأصدرت الذرّة الطاقة الفائضة بالإشعاع للوصول إلى الحالة الأخفض طاقةً. يتلاءم ميل الجملة الكموميّة للوصول إلى الحالة الطاقيّة الأخفض مع القانون الثاني في الترموديناميك الذي يقتضي زيادة أنتروبية الكون في جملة تصدر فوتونات بحيث تنتشر الطاقة على حجمٍ أكبر من الفضاء.

قبل مناقشة التشكيلة الإلكترونيّة للعناصر المختلفة، من المناسب تعريف المداري orbital بأنّه الحالة الذرّيّة المحدّدة بالأعداد الكموميّة n,l,m_l فهو يحمل الصفة الاحتمالية كما يحمل هذا الاسم بقية التسمية القديمة: مدار orbits. يُخبرنا مبدأ الاستبعاد بأنّ إلكترونين فقط يمكن أن يوجدا في أيّ مدار. يمتلك أحد هذين الإلكترونين عدداً كمومياً مغنطيسياً سبينياً $m_s=+\frac{1}{2}$، والآخر $m_s=-\frac{1}{2}$. وبما أنّ عدداً محدوداً من الإلكترونات يوجد في كلّ مداري، يكون عدد الإلكترونات التي يمكن أن تشغل الطبقات الإلكترونية المختلفة محدوداً. يبيّن الجدول 2.6 الحالات الكموميّة المسموحة لذرّة من أجل $n=1$ وحتّى $n=3$. تدلّ الأسهم الموجّهة نحو الأعلى إلى إلكترون بعدد كموميّ $m_s=+\frac{1}{2}$، والأسهم الموجّهة نحو الأسفل تدلّ على إلكتروناتٍ بعدد كموميّ $m_s=-\frac{1}{2}$. تستوعب الطبقة $n=1$ إلكترونين فقط لأنّ $m_l=0$، أي إنّ مداراً واحداً مسموح في هذه الحالة. والأعداد الكموميّة التي تعرّف هذا المدار هي $n=1,l=0,m_l=0$. تمتلك الطبقة $n=2$، طبقتين جزئيّتين، واحدة توافق $l=0$ والأخرى توافق $l=1$. تستوعب الطبقة الجزئيّة الموافقة لـ $l=0$ إلكترونين فقط لأنّ $m_l=0$. وتمتلك الطبقة الجزئيّة $l=1$ ثلاثة مداريات مسموحة موافقة لـ $m_l=1$ وَ $m_l=0$ وَ $m_l=-1$. وبما أنّ كلّ مداري يستوعب إلكترونين، يمكن إذاً للطبقة الجزئيّة $l=1$ أن تستوعب ستّة إلكترونات. وبالنتيجة تستوعب الطبقة $n=2$ ثمانية إلكترونات. بالانتقال إلى الطبقة الموافقة لـ $n=3$، نجد أنّها تمتلك ثلاث طبقات جزئيّة $(l=0,1,2)$، وتسعة

مداريات، وبإمكانها استيعاب ثمانية عشر إلكتروناً. وبشكلٍ عام، كلّ طبقة يمكنها أن تحوي عدداً أعظمياً مساوياً لـ $2n^2$ إلكتروناً.

الجدول 2.6. الحالات الكموميّة المسموحة من أجل ذرّة حتى $n=3$

الطبقة	n	1			2						3				
الطبقة الجزئيّة	l	0	0		1		0		1				2		
المدار	m_l	0	0	1	0	-1	0	1	0	-1	2	1	0	-1	-2
	m_s	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓

يمكن توضيح مبدأ الاستبعاد بتفحّص التوزّع الإلكترونيّ لبعض الذرّات الخفيفة. العدد الذرّي Z هو عدد البروتونات في النواة الذرّيّة لعنصر ما. وتحوي الذرّة معتدلة الشحنة عدداً من الإلكترونات مساوياً لـ Z. تمتلك ذرّة الهدروجين إلكتروناً واحداً فقط، ويمكن توصيفه في الحالة الأرضيّة للذرّة بإحدى مجموعتي الأعداد الكموميّة $(n=1, l=0, m_l=0, m_s=+\frac{1}{2})$ أو $(n=1, l=0, m_l=0, m_s=-\frac{1}{2})$. تكتب هذه التشكيلة الإلكترونيّة غالباً على الشكل $1s^1$. يدلّ الرمز $1s$ على حالة موافقة لـ $n=1$ وَ $l=0$، والعدد 1 في الأسّ يدلّ على وجود إلكترون واحد في الطبقة الجزئيّة s.

تمتلك ذرّة الهليوم $(Z=2)$ إلكترونين. توافق مجموعتا الأعداد الكموميّة لهما في الحالة الأرضيّة للذرّة: $(n=1, l=0, m_l=0, m_s=+\frac{1}{2})$ وَ $(n=1, l=0, m_l=0, m_s=-\frac{1}{2})$. ولا توجد تشكيلات أخرى للأعداد الكموميّة لهذه الحالة ونقول إنّ الطبقة K مملوءةٌ تماماً. تُرمّز هذه التشكيلة الإلكترونية بـ $1s^2$.

تمتلك ذرّة الليثيوم $(Z=3)$ ثلاثة إلكترونات. اثنان من الإلكترونات يوجدان في الطبقة الجزئيّة $1s$. ويوجد الإلكترون الثالث في الطبقة الجزئيّة $2s$، لأنّها أخفض بقليل طاقيّاً من الطبقة الجزئيّة $2p$. وتُكتب التشكيلة الإلكترونية لليثيوم على الشكل $1s^2 2s^1$.

يبيّن الشكل 2.19 التشكيلات الإلكترونيّة لليثيوم ولبعض العناصر التي تليه. التشكيلة الإلكترونيّة للبريليوم $(Z=4)$، بإلكتروناته الأربعة هي $1s^2 2s^2$ وللبور $(Z=5)$ هي $1s^2 2s^2 2p^1$. يمكن توصيف الإلكترون الموافق للطبقة الجزئيّة $2p$ في البور بأيّ من المجموعات الستّ متساوية الاحتمالات للأعداد الكموميّة المذكورة في الجدول 2.5 . ويظهر الشكل 2.19 هذا الإلكترون في المربّع أقصى اليسار الموافق للطبقة الجزئيّة $2p$ بسبين علويّ، إلّا أنّه يمكن أن يوجد في أيّ مربّع موافق للطبقة الجزئيّة $2p$ وبسبين علويّ أو سفليّ على حدٍّ سواء.

يمتلك الكربون $(Z = 6)$ ستّة إلكترونات، ممّا يطرح السؤال الآتي: كيف يتوضّع الإلكترونان الأخيران في الطبقة الجزئيّة $2p$؟ هل يتوضّعان في نفس المدار بسبينين متعاكسين (↑↓)، أم يشغلان مدارين مختلفين بسبينين بنفس الجهة (↑↑)؟. تبيّن النتائج التجريبيّة أنّ التشكيلة الإلكترونيّة الأخيرة (↑↑) هي الأكثر استقراراً (توافق الطاقة الأخفض)، أي إنّ الإلكترونين يوجدان في الطبقة الجزئيّة $2p$ بسبينين غير مقترنين (غير متعاكسين). أي إنّ الإلكترونين الموافقين للطبقة الجزئيّة $2p$ في ذرّة الكربون، وكذلك الإلكترونات الثلاثة الموافقة للطبقة الجزئيّة $2p$ في النتروجين $(Z = 7)$، تمتلك هذه الإلكترونات سبينات غير مقترنة كما يوضّح الشكل 2.19. ويُطلق على القاعدة العامّة التي تحكم هذه الحالات اسم **قاعدة هاند.**

عندما تمتلك ذرّة مداراتٍ بطاقاتٍ متساوية، يتمّ ملء الإلكترونات فيها بحيث يكون العدد الأعظميّ من هذه الإلكترونات بسبينات غير مقترنة. تحدث بعض الاستثناءات لهذه القاعدة في العناصر التي تقترب فيها طبقات جزئيّة من الامتلاء بشكلٍ كاملٍ أو بشكلٍ نصفيّ (نصف مملوءة).

Atom	1s	2s	2p			Electronic configuration
Li	↑↓	↑				$1s^2 2s^1$
Be	↑↓	↑↓				$1s^2 2s^2$
B	↑↓	↑↓	↑			$1s^2 2s^2 2p^1$
C	↑↓	↑↓	↑	↑		$1s^2 2s^2 2p^2$
N	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	$1s^2 2s^2 2p^3$
O	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	$1s^2 2s^2 2p^4$
F	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑	$1s^2 2s^2 2p^5$
Ne	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	$1s^2 2s^2 2p^6$

الشكل 2.19 يخضع ملء الحالات الإلكترونيّة لمبدأ الاستبعاد ولقاعدة هاند

في عام 1871، وقبل تطوير مفاهيم ميكانيك الكمّ بفترةٍ زمنيّة طويلة نسبيّاً، حاول الكيميائيّ الروسيّ ديمتري ماندلييف إيجاد ترتيبٍ معيّن للعناصر الكيميائيّة.

كان ماندلييف يحاول آنذاك تنظيم العناصر وفق ترتيبٍ منطقيّ لوضعها في جدول محتويات كتابه. رتّب الكيميائيّ الروسيّ الذرّات في جدولٍ يشبه الجدول المبيّن في الشكل 2.20، وذلك وفق الكتل الذرّيّة وأوجه التشابه بين الذرّات من الناحية الكيميائيّة. ولقد احتوى أوّل جدول اقترحه ماندلييف على العديد من الفراغات، وأعلن، آنذاك، بجرأةٍ أنّ هذه الفراغات في جدوله تعود لعناصر لم يتمّ اكتشافها بعد. وبتحديد الأعمدة حيث ينبغي أن توجد العناصر الناقصة، كان ماندلييف قادراً على تحديد الخطوط العريضة لخواصّها الكيميائيّة. وخلال العشرين عاماً من إعلان ماندلييف لجدول العناصر الكيميائيّة الذي سُمّي باسمه، تمّ اكتشاف معظم العناصر الموافقة للفراغات في جدوله.

تترتّب العناصر في الجدول الدوريّ، بحيث تمتلك العناصر المنتمية لنفس العمود خواصّ كيميائيّة متشابهة. لننظر، على سبيل المثال، العناصر في العمود الأخير في أقصى اليمين من الجدول الدوريّ، جميع هذه العناصر غازيّة في درجة حرارة الغرفة: الهيليوم (He)، النيون (Ne)، الأرغون (Ar)، الكريبتون (Kr)، الكزينون (Xe)، والرادون (Rn). الميزة البارزة لجميع هذه العناصر هي أنّها لا تؤدّي أيّ دورٍ في التفاعلات الكيميائيّة، أي لا تتّحد مع ذرّات لعناصر أخرى لتشكيل جزيئات. لهذا السبب يُطلق عيها اسم غازات خاملة أو نادرة.

يمكن، بشكلٍ جزئيّ، فهم سلوك هذه العناصر، بالنظر إلى التشكيلة الإلكترونيّة لها مثلما يبيّن الشكل2.20. يتحدّد السلوك الكيميائيّ لعنصرٍ ما بالطبقة الإلكترونيّة الخارجيّة (السطحيّة) الأبعد عن النواة. تُعطى التشكيلة الإلكترونيّة للهيليوم بـ $1s^2$، أي إنّ $n=1$، وهي الطبقة الخارجيّة لأنها الوحيدة في هذه الحالة وهي مملوءة. كما أنّ طاقة الذرّة في هذه التشكيلة أخفض من طاقتها فيما لو أنّ إلكتروناً وُجد في السويّة المتاحة التالية مباشرةً لهذه السويّة، أي الموافقة للطبقة الجزئيّة $2s$. لننظر بعدئذٍ للتشكيلة الإلكترونيّة للنيون، $1s^2 2s^2 2p^6$. هنا أيضاً نجد أنّ الطبقة الخارجيّة الموافقة لـ $n=2$ في هذه الحالة مملوءة تماماً بالعدد الأعظميّ من الإلكترونات، وأنّه يوجد فجوة طاقيّة عريضة بين الطبقة الجزئيّة المملوءة والطبقة الجزئيّة المتاحة التي تليها مباشرةً، أي $3s$. أمّا التشكيلة الإلكترونيّة للأرغون فهي $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$. هنا نجد أنّ الطبقة الجزئيّة $3p$ مملوءة تماماً بالعدد الأعظميّ من الإلكترونات، وأنّه يوجد فجوة طاقيّة عريضة بين الطبقة الجزئيّة المملوءة والطبقة الجزئيّة المتاحة التي تليها مباشرةً، أي $3d$. يستمرّ هذا النموذج من أجل جميع الغازات النادرة، فالكريبتون يمتلك طبقة جزئيّة مملوءة توافق $4p$، ويمتلك الكزينون طبقة جزئيّة مملوءة تماماً، $5p$، وأخيراً تكون الطبقة الجزئيّة $6p$ هي المملوءة في حالة الرادون.

يضمّ العمود إلى يسار عمود الغازات النادرة في الجدول الدوريّ مجموعة العناصر التي نطلق عليها اسم الهالوجينات: الفلور، والكلور، وهما غازان، البروم وهو سائل، اليود، والأستاتين، وهما في الحالة الصلبة. في كلٍّ من ذرّات هذه العناصر، وفي الطبقة الجزئيّة الخارجيّة للتشكيلة الإلكترونيّة فيها ينقص إلكترونٌ واحدٌ لملء الطبقة الجزئيّة الخارجيّة بشكلٍ كامل. لهذا السبب، تكون الهالوجينات نشطةً كيميائيّاً، وتستقبل بسهولة إلكتروناً من ذرّةٍ أخرى لتشكّل طبقة خارجيّة مملوءة تماماً. تميل الهالوجينات لتشكيل روابط أيونيّة مع ذرّاتٍ من الجانب الآخر للجدول الدوريّ. في المصابيح الضوئيّة الهالوجينيّة، تتّحد ذرّات البروم أو اليود مع أبخرة ذرّات التنغستين الصادرة عن السلك المتوهّج في المصباح، وتعيدها إلى السلك مرّةً ثانية، مسبّبةً توهّج المصباح بشكلٍ مستمرّ. بالإضافة إلى ذلك، يمكن رفع درجة حرارة سلك التسخين في

المصباح الهالوجينيّ أعلى من المصابيح الضوئيّة العاديّة، ممّا يعطي ضوءاً مائلاً إلى اللون الأبيض وأكثر سطوعاً.

Group I	Group II	Transition elements										Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group 0
H 1 $1s^1$																H 1 $1s^1$	He 2 $1s^2$
Li 3 $2s^1$	Be 4 $2s^2$											B 5 $2p^1$	C 6 $2p^2$	N 7 $2p^3$	O 8 $2p^4$	F 9 $2p^5$	Ne 10 $2p^6$
Na 11 $3s^1$	Mg 12 $3s^2$											Al 13 $3p^1$	Si 14 $3p^2$	P 15 $3p^3$	S 16 $3p^4$	Cl 17 $3p^5$	Ar 18 $3p^6$
K 19 $4s^1$	Ca 20 $4s^2$	Sc 21 $3d^1 4s^2$	Ti 22 $3d^2 4s^2$	V 23 $3d^3 4s^2$	Cr 24 $3d^5 4s^1$	Mn 25 $3d^5 4s^2$	Fe 26 $3d^6 4s^2$	Co 27 $3d^7 4s^2$	Ni 28 $3d^8 4s^2$	Cu 29 $3d^{10} 4s^1$	Zn 30 $3d^{10} 4s^2$	Ga 31 $4p^1$	Ge 32 $4p^2$	As 33 $4p^3$	Se 34 $4p^4$	Br 35 $4p^5$	Kr 36 $4p^6$
Rb 37 $5s^1$	Sr 38 $5s^2$	Y 39 $4d^1 5s^2$	Zr 40 $4d^2 5s^2$	Nb 41 $4d^4 5s^1$	Mo 42 $4d^5 5s^1$	Tc 43 $4d^5 5s^2$	Ru 44 $4d^7 5s^1$	Rh 45 $4d^8 5s^1$	Pd 46 $4d^{10}$	Ag 47 $4d^{10} 5s^1$	Cd 48 $4d^{10} 5s^2$	In 49 $5p^1$	Sn 50 $5p^2$	Sb 51 $5p^3$	Te 52 $5p^4$	I 53 $5p^5$	Xe 54 $5p^6$
Cs 55 $6s^1$	Ba 56 $6s^2$	57-71*	Hf 72 $5d^2 6s^2$	Ta 73 $5d^3 6s^2$	W 74 $5d^4 6s^2$	Re 75 $5d^5 6s^2$	Os 76 $5d^6 6s^2$	Ir 77 $5d^7 6s^2$	Pt 78 $5d^9 6s^1$	Au 79 $5d^{10} 6s^1$	Hg 80 $5d^{10} 6s^2$	Tl 81 $6p^1$	Pb 82 $6p^2$	Bi 83 $6p^3$	Po 84 $6p^4$	At 85 $6p^5$	Rn 86 $6p^6$
Fr 87 $7s^1$	Ra 88 $7s^2$	89-103**	Rf 104 $6d^2 7s^2$	Db 105 $6d^3 7s^2$	Sg 106 $6d^4 7s^2$	Bh 107 $6d^5 7s^2$	Hs 108 $6d^6 7s^2$	Mt 109 $6d^7 7s^2$	Ds 110 $6d^9 7s^1$	Rg 111	112		114		116		

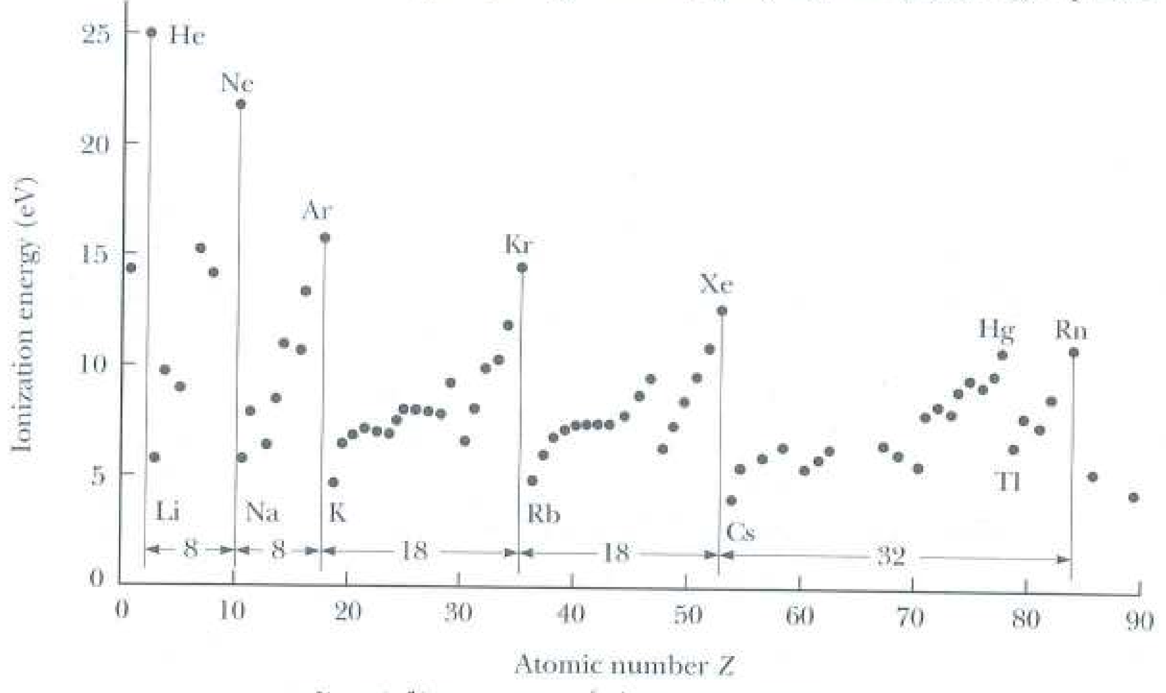
*Lanthanide series	La 57 $5d^1 6s^2$	Ce 58 [illegible]	Pr 59 $4f^3 6s^2$	Nd 60 $4f^4 6s^2$	Pm 61 $4f^5 6s^2$	Sm 62 $4f^6 6s^2$	Eu 63 $4f^7 6s^2$	Gd 64 [illegible]	Tb 65 [illegible]	Dy 66 $4f^{10} 6s^2$	Ho 67 $4f^{11} 6s^2$	Er 68 $4f^{12} 6s^2$	Tm 69 $4f^{13} 6s^2$	Yb 70 $4f^{14} 6s^2$	Lu 71 [illegible]
**Actinide series	Ac 89 $6d^1 7s^2$	Th 90 $6d^2 7s^2$	Pa 91 [illegible]	U 92 [illegible]	Np 93 [illegible]	Pu 94 $5f^6 7s^2$	Am 95 $5f^7 7s^2$	Cm 96 [illegible]	Bk 97 [illegible]	Cf 98 $5f^{10} 7s^2$	Es 99 $5f^{11} 7s^2$	Fm 100 $5f^{12} 7s^2$	Md 101 $5f^{13} 7s^2$	No 102 $5f^{14} 7s^2$	Lr 103 [illegible]

الشكل 2.20. الجدول الدوري للعناصر وهو تمثيل جدوليّ مرتّب للعناصر يُظهر سلوكها الكيميائيّ الدوريّ. تسلك العناصر في عمودٍ محدّد نفس السلوك الكيميائيّ. يُظهر الجدول الرمز الكيميائيّ للعنصر، العدد الذرّي، والترتيب الإلكتروني.

نجد على الجانب الأيسر من الجدول الدوريّ، المجموعة I من العناصر والمكوّنة من الهدروجين والمعادن القلويّة، الليثيوم، الصوديوم، البوتاسيوم، الروبيديوم، السيزيوم، والفرانسيوم. تحتوي ذرّات هذه العناصر جميعها على إلكترونٍ واحد في طبقةٍ جزئيّة تلي مباشرةً طبقةً جزئيّةً مملوءةً تماماً. لذلك، يمكن لهذه العناصر أن تشكّل بسهولة أيونات موجبة لأنّ إلكترون الطبقة الجزئيّة السطحيّة الوحيد قليل الارتباط ويمكن فصله بسهولة عن ذرّته. ولهذا السبب تكون ذرّات المعادن القلويّة نشطة كيميائيّاً، وبإمكانها تشكيل روابط قويّة جدّاً مع الذرّات الهالوجينيّة. مثلاً، ملح الطعام، $NaCl$ هو مركّبٌ من معدن قلويّ (Na) وهالوجين (Cl). وبسبب ضعف ارتباط الإلكترون السطحيّ في المعادن القلويّة النقيّة، فهي تعتبر نواقل جيّدة للكهرباء. إلّا أنّه، وبسبب فعاليّتها الكيميائيّة العالية، لا توجد عادةً بشكلٍ نقيّ في الطبيعة.

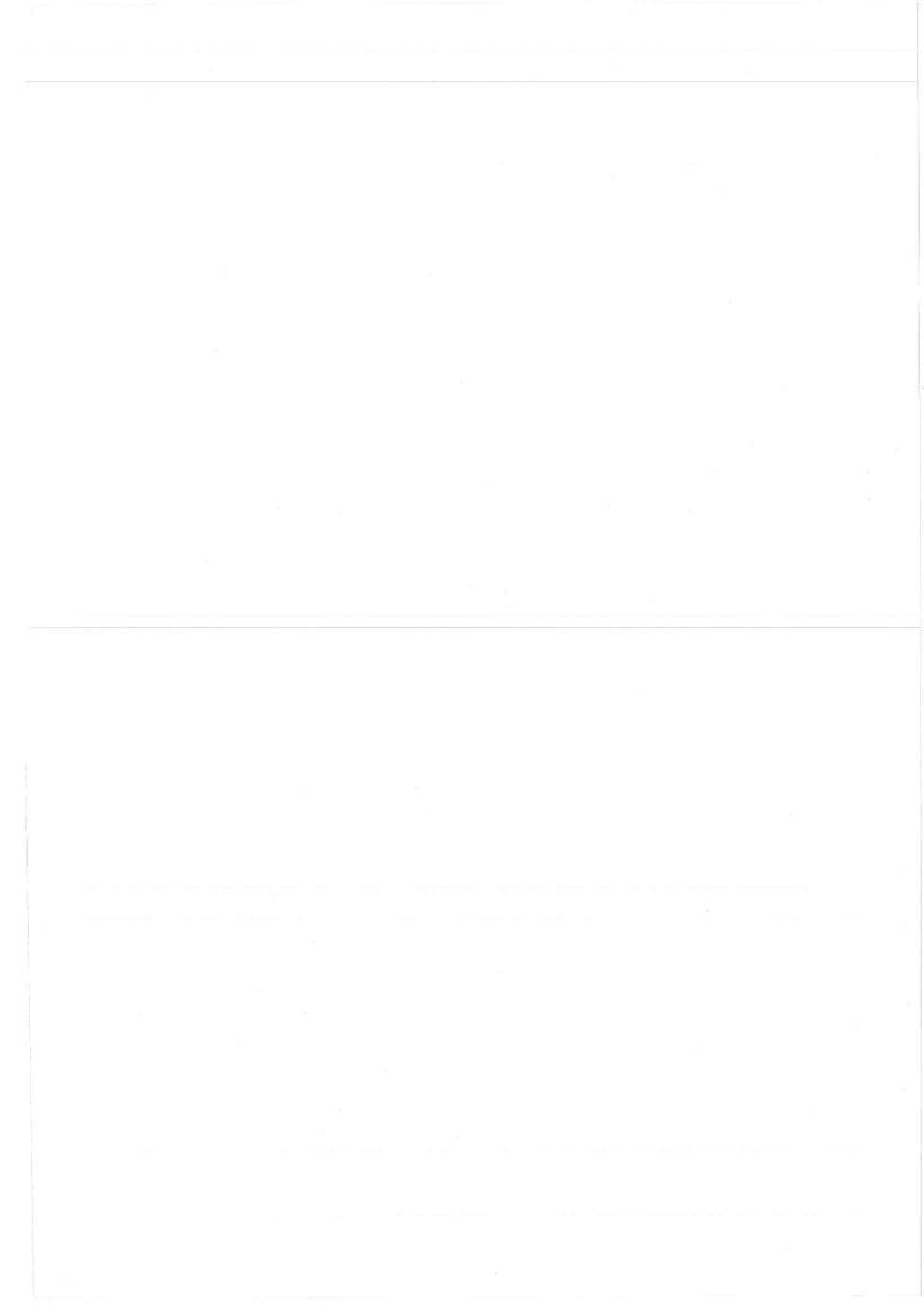
من المفيد أخيراً رسم طاقة التأيّن بدلالة العدد الذرّيّ Z كما يوضّح الشكل 2.21. نلاحظ الترتيب $Z = 2,8,8,18,18,32$ ، الموافق للذرا المختلفة في الرسم البيانيّ. ينتج هذا الترتيب مباشرةً عن تطبيق

مبدأ الاستبعاد، وهو يفسّر تشابه الخواص الكيميائيّة للعناصر المنتمية لنفس المجموعة في الجدول الدوري. فالذّرا عند $Z = 2,10,18,36$ ، مثلاً، توافق الغازات النادرة الهيليوم، والنيون، والأرغون، والكريبتون، على الترتيب، وهي كما سبق وذكرنا، تمتلك جميعها طبقاتٍ خارجيّة مملوءة تماماً. تسلك هذه العناصر سلوكاً كيميائيّاً متشابهاً، وتتميّز بطاقات تأيّن عالية نسبيّاً.



الشكل 2.21. طاقة تأيّن العناصر بدلالة العدد الذّرّي

يمكن أن تعمم النظرية الكمومية لتشمل ليس فقط الذرات وإنما مجموعة منها كالجزيئات والبلورات فيقال إنه يمكن تمثيل سلوك الجزيئات أو البلورات بسلوك تابع موجي للجملة يحقق معادلة شرودنغر للجملة فتحتوي المعادلة عندئذ على الطاقات الكامنة المتبادلة كلها وكذلك الاندفاعات لمركباتها جميعها، ثم يبحث عن التابع الموجي أي عن حلول هذه المعادلة. لكن كما يظهر من تكوين المعادلة صعوبة إيجاد حل لها، فيلجأ إلى تقريبات مناسبة كما في دراستنا للجزيئات ثنائية الذرة في فصل إشعاعات التيراهرتز.



الفصل الثالث

علم الضوء

Optics

نبدأ بدراسة الضوء المرئي من طيف الإشعاعات الكهرطيسية؛ لأنه أول مجال تم التعرف عليه بجهاز الإبصار الذي يطل الإنسان من خلاله على العالم الخارجي، وقد تم تناوله بتطبيقات متعددة تتضمن المجال المرئي بالإضافة إلى أجزاء من المجالين اللذين يحيطان به، وهما مجالا الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء، وقد كانت المطيافية الضوئية من أهم هذه التطبيقات. كما سيتضمن تطور معرفة القوانين التي يخضع لها انتشاره تاريخياً بدءاً مما يسمى الضوء الهندسي Geometrical Optics والضوء الفيزيائي أو الموجي Wave Optics وانتهاء بالضوء الكمومي أو الفوتونيات Photonics. وقد رافقت هذه القوانين معرفتنا لطبيعة الضوء.

3.1. طبيعة الضوء

قبل بداية القرن السابع عشر كان ينظر للضوء على أنه تيار من الجسيمات التي تصدر إما من الجسم الذي ينظر إليه، وإمّا تنبعث من عيني المشاهد. ولكن نيوتن المهندس الرئيسي للنموذج الجسيمي للضوء تمسك بأن الجسيمات تصدر من المنبع الضوئي، وتمرّ في الأوساط المختلفة، وتحث حاسة الرؤية لدى دخولها العين. وباستخدام هذه الفكرة كان قادراً على تفسير الانعكاس والانكسار بصعوبة. لكن ذلك النموذج لم يكن قادراً على تفسير ظواهر الانعراج والتداخل والاستقطاب. فقد كان يعتمد الانتشار المستقيم للجسيمات، إضافة إلى أن النموذج تنبأ بتغير قرينة الانكسار من وسط إلى آخر بصورة خاطئة.

وقد وجد الفيزيائي والفلكي هويغنز أنه يمكن للنموذج الموجي للضوء أن يفسر الانعكاس والانكسار إضافة إلى التداخل والانعراج. وقد جاء يانغ Young بأول برهان تجريبي على الطبيعة الموجية للضوء، عندما برهن على أن الأشعة الضوئية تتداخل فيما بينها في شروط مناسبة على نحو نموذج تداخل الأمواج، تماماً كالأمواج الميكانيكية (الفصل18). وقد تناولنا في الفقرة 1.1 الطبيعة المثنوية للإشعاعات الكهرطيسية.

غير أن النموذج الموجي للضوء لم يستطع تفسير المفعول الكهرضوئي وإشعاع الجسم الأسود، فاقترح نموذج التكمية quantization الذي ابتكر بلانك مفهومه، وينص على أن طاقة الموجة الضوئية موجودة في جسيمات تدعى فوتونات photons (حبات ضوئية)؛ ومن ثم يقال إن الطاقة مكمّاة quantized، ومن

ثمَّ قُبل مبدأ المثنوية الموجية – الجسيمية. وبحسب مبدأ آينشتاين، تتناسب طاقة الفوتون طردياً مع تواتر موجة الإشعاع الكهرطيسي.

$$E = hf \qquad (3.1)$$

ووفق الطبيعة المثنوية، يبدي الضوء خصائص موجية في بعض الحالات وخصائص جسيمية في حالات أخرى. ولم يعد ملائماً التساؤل إذا كان الضوء موجة أم جسيماً. إذ يسلك الضوء في بعض الأحيان سلوك موجة، ويسلك في مرات أخرى سلوك جسيم. ينتشر الضوء في الخلاء بسرعة $c = 3\times10^8 m/s$.

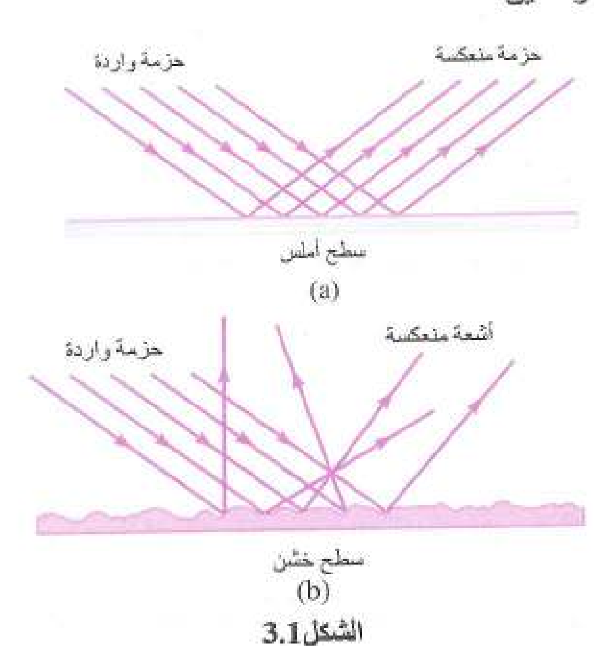
3.2. الضوء الهندسي

يعدّ الضوء الهندسي Geometrical Optics تقريباً أولياً لسلوك الضوء لا يطبق إلّا في الحالة التي يكون فيها التداخل والانعراج مهملين. ولكي يكون الانعراج مهملاً، يجب على أبعاد الأجسام والفتحات أن تكون كبيرة بالنسبة لطول موجة الضوء. وهو لا يتطرق إلى الشدة الضوئية للجسم أو الخيال، بل يعطي مواقع تشكل الخيال وعلاقتها بموقع الجسم وكذلك أبعاد الخيال مقارنة بأبعاد الجسم إضافة إلى كون الخيال مقلوباً أم صحيحاً ووهمياً أم حقيقياً. يدعى الضوء الهندسي أيضاً الضوء الشعاعي Ray Optics لأنه يستخدم طريقة الأشعة في تمثيل الانتشار، فنقول: إنّ انتشار الضوء في وسط متجانس يكون وفق خطوط مستقيمة في اتجاه يتحدد بالأشعة الممثلة للانتشار.

يعتمد الضوء الهندسي في متابعة انتشاره في أوساط مختلفة على قانونين في الانعكاس وقانونين في الانكسار في كل مرة يصادف الضوء سطحاً يفصل بين وسطين.

عندما ينعكس الضوء عن سطح أملس smooth فإن الأشعة الواردة بزاوية معينة تنعكس بالزاوية نفسها. يطلق على هذا الانعكاس "الانعكاس المرآوي" specular reflection (الشكل3.1a).

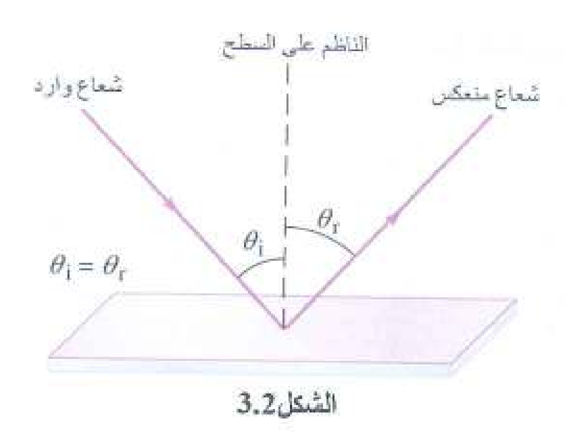
ويدعى الانعكاس عن سطح خشن rough "الانعكاس التبعثري أو الانتثاري diffuse reflection. يمكن تحديد الملاسة والخشونة بالاعتماد على طول موجة الأشعة الواردة (الشكل3.1b).



الشكل3.1

3.2.1. قانونا الانعكاس

ينص القانون الأول على أن زاوية الورود تساوي زاوية الانعكاس، بينما ينص القانون الثاني على وقوع كل من الشعاع الوارد والشعاع المنعكس والناظم في المستوي نفسه، ووقوع الشعاعين الوارد والمنعكس في جهتين متقابلتين من الناظم (الشكل3.2).



الشكل3.2

3.2.2. قانونا الانكسار

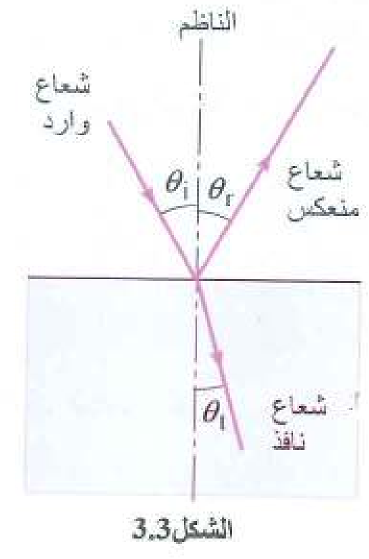
عندما تعبر الأشعة الضوئية السطح الفاصل بين وسطين مختلفين فإنها تغير اتجاهها بسبب تغير سرعتها. يطلق اسم الانكسار refraction على هذه الظاهرة. ويمكن النظر للانكسار من ناحية موجية كما في الشكل3.18 أو من وجهة نظر شعاعية كما في الشكل3.3.

قانون سنيل Snell's law

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t$$

حيث n_1 وn_2 قرينتا الانكسار (قرينة الانكسار تساوي نسبة سرعة الضوء في الخلاء إلى سرعته في الوسط) وتعود الأدلة إلى الوسطين المختلفين. تقاس زاويتا الورود والانكسار بالنسبة إلى الناظم. يبتعد الشعاع المنكسر عن الناظم لدى الانتقال من وسط قرينة انكساره عالية إلى وسط قرينة انكساره منخفضة.

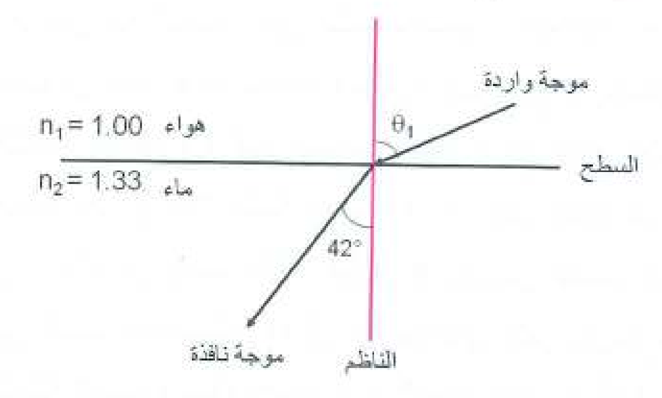
والقانون الثاني هو وقوع الشعاع الوارد والمنكسر والناظم على السطح في مستوٍ واحد.



الشكل3.3

ويلاحظ أن للناظم على السطح ميزة مهمّة: ففي حالة الانعكاس يرتد الضوء الوارد وفق الناظم على نفسه وفق المنحى الذي ورد وفقه، وفي حالة الانكسار ينفذ من السطح الكاسر من دون انكسار.

مثال3.1. يسقط ضوء الشمس على سطح بحيرة. يرى غواص الشمس بزاوية 42.0° بالنسبة إلى الشاقول. ما الزاوية التي تصنعها أشعة الشمس في الهواء مع الشاقول؟



$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$(1.00)\sin\theta_1 = (1.333)\sin 42^\circ$$

$$\sin\theta_1 = 0.8920$$

$$\theta_1 = 63.1^\circ$$

يظهر في الجدول1 الآتي قيم قرينة الانكسار لأوساط شائعة.

الجدول1. قرائن الانكسار عند الطول الموجي 589.3nm في الخلاء (في الدرجة 20°C ما لم يذكر غير ذلك

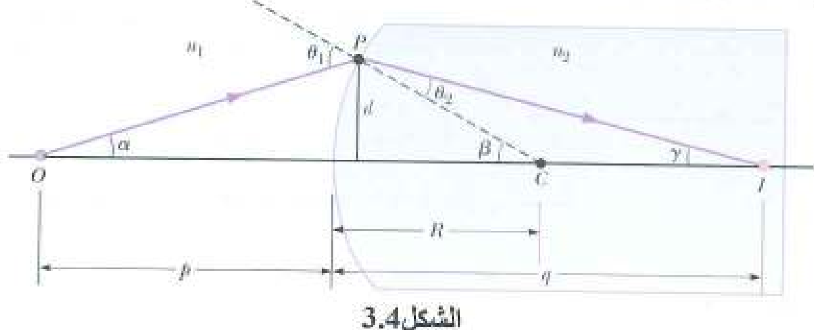
المادة	قرينة الانكسار	المادة	قرينة الانكسار
السوائل		المواد الصلبة	
الماء	1.333	الجليد (في الدرجة ^{o}C)	1.309
الأستون	1.36	الفلوريت	1.434
الكحول الإيتيلي	1.361	الكوارتز المصهور	1.458
رباعي كلور الكربون	1.461	البوليستيرين	1.49
الغليسرين	1.473	Lucite	1.5
محلول السكر 80%	1.49	البلغسيغلاس	1.51
البنزين	1.501	الزجاج التاجي	1.517
ثنائي كبريت الكربون	1.628	الزجاج الصفيحي	1.523
يوديد المثلين	1.74	كلوريد الصوديوم	1.544
		زجاج القلنت الخفيف	1.58
الغازات في الدرجة ^{o}C والضغط 1atm		زجاج القلنت الكثيف	1.655
		الياقوت	1.77
الهليوم	1.000 036	الزركون	1.923
الإيتير الإيتلي	1.000 152	الماس	2.419
بخار الماء	1.000 250	ثنائي أكسيد التيتانيوم	2.9
الهواء الجاف	1.000 293	فوسفيد الغاليوم	3.5
ثنائي أكسيد الكربون	1.000 449		

3.2.3. الكاسر الكروي

يعدّ الكاسر الكروي من أهم تطبيقات قوانين الانعكاس والانكسار عند السطوح الكروية. تظهر في الشكل3.4 أبرز خصائص سطح كاسر كروي، نصف قطره R، ويفصل بين وسطين شفافين قرينتا انكسارهما n_1 و n_2. يتميز هذا الكاسر بمحوره الضوئي الواصل بين نقطة مضيئة O ومركز الكرة التي اقتطع منها الكاسر، فيجتازه الشعاع الضوئي الذي ينتشر وفقه دون انكسار. وتسمى نقطة تقاطع المحور الضوئي مع الكاسر رأس الكاسر. تتعين زاوية ورود θ_1 شعاع ضوئي يصنع الزاوية α مع المحور الضوئي عند نقطة التقائه بالسطح الكاسر في P بالناظم CP على السطح. تخضع زاوية انكسار θ_2 الشعاع المنكسر PI الذي يصنع الزاوية γ مع المحور الضوئي، لقانون سنيل. من أهم تطبيقات الكاسر معرفة بعد q خيال نقطة مضيئة O إذا عرف بعدها عن رأس الكاسر p، أي إيجاد العلاقة التي تعطي q بدلالة p ونصف قطر الكاسر R وقرينتي انكسار الوسطين n_1 و n_2 (الشكل3.4). تصدر الأشعة من الجسم عند النقطة O في الوسط الذي يتميز بقرينة الانكسار $n = n_1$. ويفضل أيضاً أن يكون خيال النقطة المضيئة نقطة واحدة أيضاً (النقطة I في الشكل3.4)، لذلك يتطلب أن تكون الزوايا التي تصنعها

الأشعة الصادرة عن النقطة المضيئة صغيرة ويمكن إلباس ظلها أو جيبها بالزاوية مقيسة بالراديان.
وبالاعتماد على قانون سنيل والزوايا الصغيرة نجد بسهولة العلاقة الآتية:

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{q}=\frac{n_2-n_1}{R} \qquad (3.2)$$



الشكل3.4

يعرف طرف السطح الذي تصدر منه الأشعة بأنه الطرف الأمامي، في حين يدعى الطرف الآخر بالطرف الخلفي. تتشكل الأخيلة الحقيقية بالانكسار خلف السطح. ولذلك فإن اصطلاحات الإشارة لكل من q و R للسطوح الكاسرة تعاكس حالة السطوح العاكسة.

تشكل الأخيلة بالانكسار (الشكل3.5)

ندرس الأشعة المقاربة للمحور الضوئي للكاسر الكروي التي تغادر النقطة O، فينكسر جميعها عند السطح ويتجمع في النقطة الخيال I. تربط العلاقة (3.2) بين بعدي الجسم والخيال في هذه الحالة.

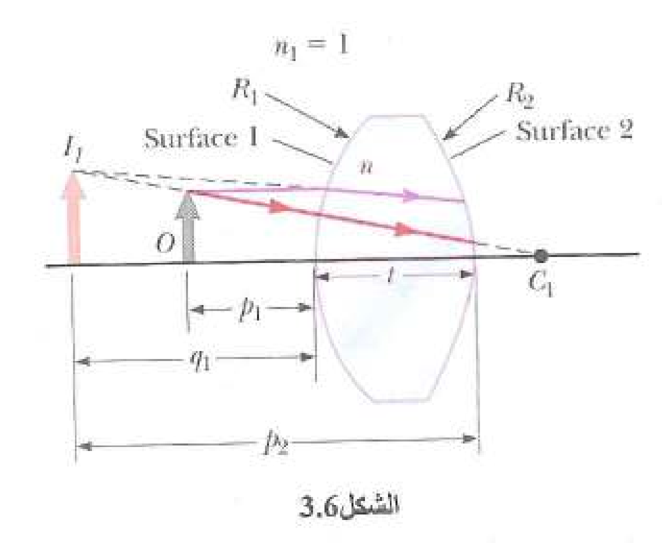
الشكل3.5. الأشعة التي تصنع زوايا صغيرة مع المحور الرئيسي تتباعد من النقطة الجسمية O وتنكسر نحو النقطة الخيال I

الأخيلة التي تشكلها العدسات الرقيقة

يشيع استخدام العدسات في تشكيل الأخيلة بالانكسار. حيث تستخدم العدسات في العديد من الأجهزة البصرية كالمصورات Cameras والمقاريب Telescopes والمجاهر Microscopes. يخضع الضوء المار في عدسة للانكسار عند سطحين كاسرين كرويين، والخيال الذي يشكله أحد السطحين الكاسرين يؤدي دور جسم للسطح الآخر.

تحديد موقع خيال تشكله عدسة

تتميز العدسة بقرينة انكسارها n وبسطحين كرويين نصفا قطريهما R_1 و R_2، حيث R_1 نصف قطر انحناء سطح العدسة الذي يبلغه ضوء الجسم أولاً و R_2 نصف قطر انحناء السطح الآخر.
يوضع الجسم في النقطة O على بعد p1 أمام السطح الأول. فيكون الخيال العائد للسطح1 وهمياً، ومن ثمّ يقع I_1 إلى يسار السطح.



الشكل3.6

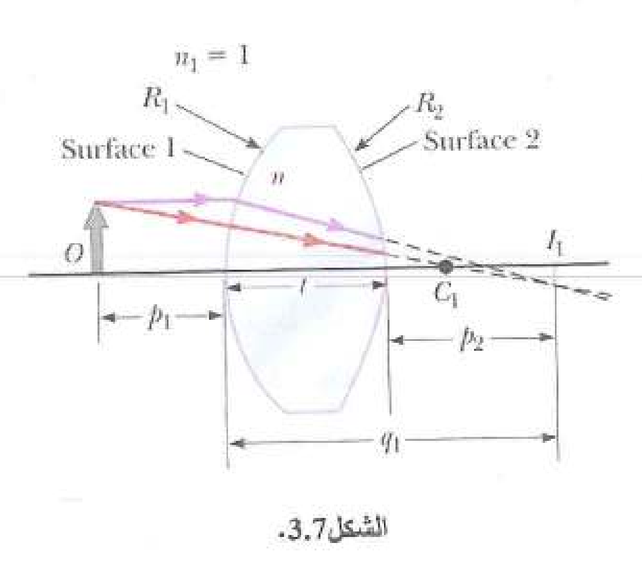
الخيال الذي يشكله السطح1. لما كان الهواء يحيط بالعدسة فإن $n_1 = 1$ ومن ثَمَّ :

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{q}=\frac{n_2-n_1}{R} \rightarrow \frac{1}{p_1}+\frac{n}{q_1}=\frac{n-1}{R_1}$$

إذا كان الخيال الناجم عن السطح 1 وهمياً فإن q_1 يكون سالباً؛ ويكون موجباً عندما يكون الخيال حقيقياً.

الخيال الذي يشكله السطح 2 .

في حالة السطح 2، يكون $n_1 = n$ و $n_2 = 1$.



الشكل3.7.

وتكون الأشعة الضوئية التي تقترب من السطح 2 في العدسة وتنكسر في الهواء. يستخدم الرمز p_2 لبعد الجسم عن السطح 2 و q_2 لبعد الخيال.

$$\frac{n_1}{p}+\frac{n_2}{q}=\frac{n_2-n_1}{R} \rightarrow \frac{n}{p_2}+\frac{1}{q_2}=\frac{1-n}{R_1}$$

ولتحديد موقع الخيال الذي يشكله السطح 2، يؤدي خيال السطح 1 دور جسم بالنسبة للسطح 2. فيكون الخيال الناجم عن السطح 1 حقيقياً، ومن ثَمَّ يقع I_1 إلى يمين السطح.

3.2.4. معادلة صنّاع العدسات

إذا تشكل خيال وهمي بالسطح 1، فإن $p_2 = -q_1 + t$ ، حيث q_1 سالب، و t ثخانة العدسة. وإذا تشكل خيال حقيقي بالسطح 1، فإن $p_2 = -q_1 + t$ ، و q_1 موجب. ومن ثم:

$$\frac{1}{p_1}+\frac{1}{q_2}=(n-1)\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)=\frac{1}{f} \qquad (3.3)$$

تدعى هذه المعادلة معادلة صنّاع العدسات Lens-makers' Equation. يمكن أن تستخدم في تحديد قيمتي R_1 و R_2 اللازمتين في حالة قيمة معينة لقرينة الانكسار. ينتج من هذه المعادلة حالتان خاصتان، الأولى عندما تكون النقطة بعيدة جداً، فنقول إنها في اللانهاية، ومن ثَمَّ تكون الأشعة الصادرة عنها موازية للمحور الأساسي وتتجمع في نقطة واحدة تسمى بؤرة العدسة focus الخيالية، ويكون البعد البؤري عن الكاسر الثاني f. والحالة الثانية عندما يكون الخيال في اللانهاية، أي إن الأشعة بعد الانكسار

موازية للمحور الأساسي، ونقول إنها صادرة من نقطة تدعى البؤرة الجسمية، ويكون البعد البؤري عن الكاسر الأول f أيضاً.

الخيال الذي تشكله عدسة رقيقة

العدسة الرقيقة هي العدسة التي تكون ثخانتها صغيرة مقارنة بنصفي قطري انحنائها، إذْ يمكن إهمال ثخانتها t. في هذه الحالة يكون $p_2 = -q_1$ مهما يكن نوع الخيال. ومن ثم يمكن حذف دليلي الرمزين p_1 و q_2.

معادلة العدسة الرقيقة

العلاقة بين البعد البؤري وبعد الجسم وبعد الخيال هي نفسها في حالة المرآة

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \tag{3.4}$$

ملاحظة. يمكن باستعمال مجموعة عدسات الحصول على مجهر أو نظارة تفصل حسب الطلب.

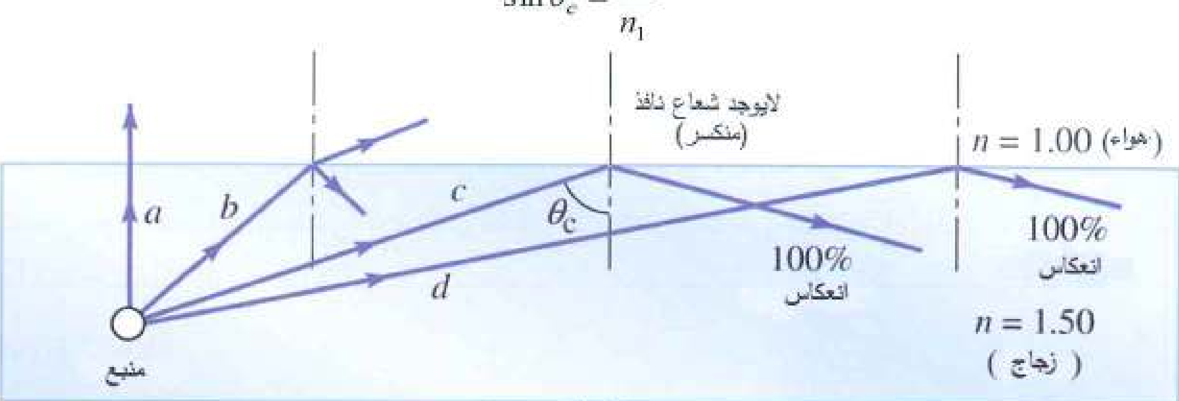
3.2.5. الانعكاس الداخلي الكلي Total Internal Reflection

توجد حالة مهمّة في قانون الانكسار تتعلق بوجوب كون الجيب أصغر من الواحد. فزاوية الورود التي تقابل زاوية انكسار $90°$ تدعى "الزاوية الحرجة" critical angle θ_c

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

$$n_1 \sin\theta_c = n_2 \sin 90°$$

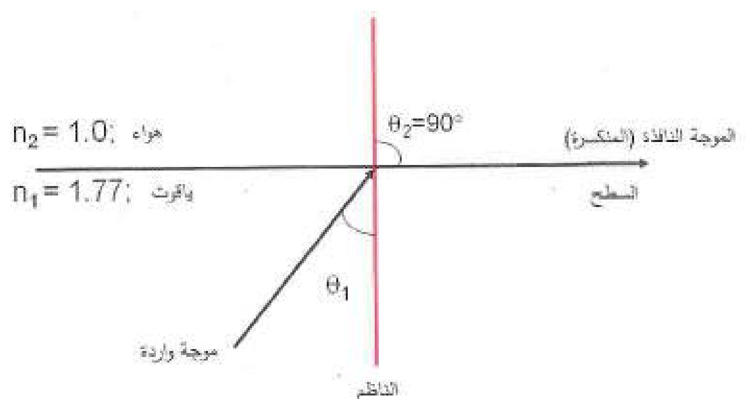
$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$



الشكل3.8

وإذا ورد شعاع بزاوية ورود أكبر من أو تساوي الزاوية الحرجة، فلن تكون ثمة موجة منكسرة في الوسط الآخر، وستنعكس الموجة كلياً عند السطح الفاصل.

لا يحدث الانعكاس الكلي إلّا عندما تكون قرينة انكسار وسط الورود أكبر من قرينة انكسار الوسط الثاني. ويستفاد منها في انتشار الضوء في الألياف الضوئية التي تنقل أشعة الليزر وفي استعمال الموشور في حالات خاصة كمرآة عاكسة.



مثال3.2. احسب الزاوية الحرجة للياقوت يحيط به الهواء

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$
$$(1.77)\sin\theta_c = (1.00)\sin 90°$$
$$\sin\theta_c = 0.565$$
$$\sin\theta_c = 34.4°$$

3.2.6. المصوّرات

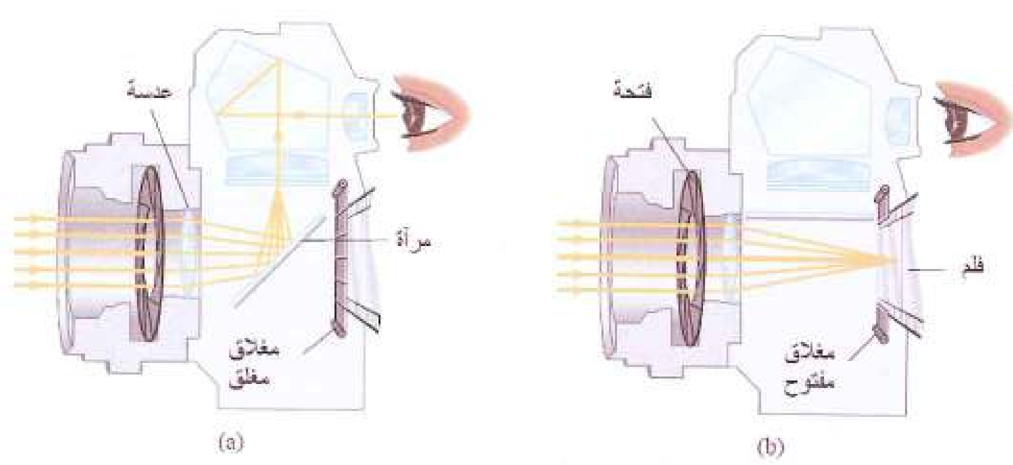
إن استعمال عدة عدسات بأنواع مختلفة تبعد فيما بينها بمسافات معينة هي التي تعين وظيفة الجهاز البصري. ويوجد أنواع كثيرة من الأجهزة منها المجهر بأنواعه المختلفة ومنها المقراب والمنظار وأدوات التصوير.

تعدّ المصوّرة ذات الثقب pinhole camera الخالية من العدسات أولى المصورات، فهي تمثل عملياً ما يحدث عند تحقق شروط غاوص. تليها من حيث التعقيد المصوّرة التي لا يوجد فيها إلّا عدسة واحدة لتشكيل صورة، وبطبيعة الحال إن إدخال العدسة حسّن من الخيال ومن مدى عمل المصوّرة، و يبين الشكل3.9 مصوّرة بسيطة 35mm. تتضمن هذه المصوّرة عدسة مقربة لتشكيل خيال حقيقي على الفلم. يجب أن يكون الخيال حقيقياً لتعريض الفلم expose (أي لإحداث تفاعل كيميائي). ويمكن أن يضاف للمصورة عدسات أخرى لتوسيع مجال تطبيقها وتحسين الصورة لكنه في جميعها يجب أن تكون الأشعة الضوئية التي تصدر من نقطة من الجسم الذي يجري تصويره متقاربة في نقطة مقابلة على الفلم. وقد استعيض عن الفلم في المصوّرة الرقمية بصفيف من المحسّات في مصوّرة الأدوات المقترنة بالشحنة charge-coupled device CCD.

المصوّرة البسيطة

في المصوّرات العالية الجودة، يمكن ضبط المسافة بين العدسة والفلم وفقاً لمعادلة العدسة، بحيث يتشكل على الفلم خيال حاد sharp. يجب أن تكون العدسة، في حالة الأجسام البعيدة، على بعد بؤري واحد من الفلم. في حالة الأجسام الأقرب، يجب أن تكون العدسة أبعد قليلاً عن ذلك لأن الخيال يتشكل وراء النقطة البؤرية. في المصوّرات البسيطة الثابتة البؤرة عدسة ثابتة لا يمكن تحريكها. يمكن أن يعطي مثل هذه المصوّرات أخيلة جيدة للأجسام البعيدة، ولكن في حالة الأجسام الأقرب يصبح مهماً أكثر تعديل موقع

العدسة. أما جهاز إسقاط الشرائح أو الصور المتحركة فهو عكس المصوِّرة. حيث يوضع منبع ضوئي في النقطة البؤرية لعدسة مقربة بحيث تخرج الأشعة المتوازية تقريباً من العدسة، فتضيء الشريحة. تشكل عدسة مقربة أخرى خيالاً مقلوباً حقيقياً على شاشة بعيدة.



الشكل3.9. تستخدم هذه المصوِّرة 35-mm عدسة مقربة أحادية لتشكيل خيالات حقيقية على الفلم. الرقم 35mm ليس البعد البؤري للعدسة؛ بل هو عرض الفلم. يتم تبئير المصوِّرة على أجسام على أبعاد مختلفة بتحريك العدسة أقرب إلى الفلم أو أبعد عنه. (a) المغلاق مغلق، يمنع تعرض الفلم. (b) تزاح المرآة من الطريق swings out ويفتح المغلاق لبرهة قصيرة لتعريض الفلم.

مثال3.3. مصوَّرة ثابتة البؤرة

عدسة مصوِّرة بعدها البؤري 50.0mm. تؤخذ صور ضوئية لأجسام تقع أبعادها عن العدسة من اللانهاية إلى أماكن بقرب 6.00m. **(a)** على أي بعد من العدسة يتشكل خيال جسم يقع في اللانهاية؟ **(b)** على أي بعد من العدسة يتشكل خيال لجسم يقع على بعد 6.00m من العدسة.

الطريقة. نطبق معادلة العدسات الرقيقة في حالة البعدين لنوجد بعد الخيال في كل من الحالتين.

الحل (a) معادلة العدسات الرقيقة هي

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$$

في حالة جسم في اللانهاية يكون $1/p=1/\infty=0$، ومِن ثمّ $0+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$ ومِن ثمّ فإن $q=f$. بعد الخيال يساوي البعد البؤري؛ أي الخيال يقع على بعد 50.0mm من العدسة.

(b) بعد الجسم عن المصوِّرة في هذه المرة $p=6.00m$ ومِن ثَمّ $\frac{1}{6.00m}+\frac{1}{q}=\frac{1}{50.0\times10^{-3}m}$،

ومنه

$$\frac{1}{q}=\frac{1}{50.0\times10^{-3}m}-\frac{1}{6.00m}$$ ، أو $q=50.4mm$

المناقشة. تتشكل الأخيلة بحيث تقع جميعها ضمن 0.4mm، ومِن ثَمَّ تستطيع المصوّرة أن تشكل أخيلة مبأرة بشكل جيد لأجسام تبعد من 6m إلى اللانهاية ببعد ثابت بين العدسة والفلم.

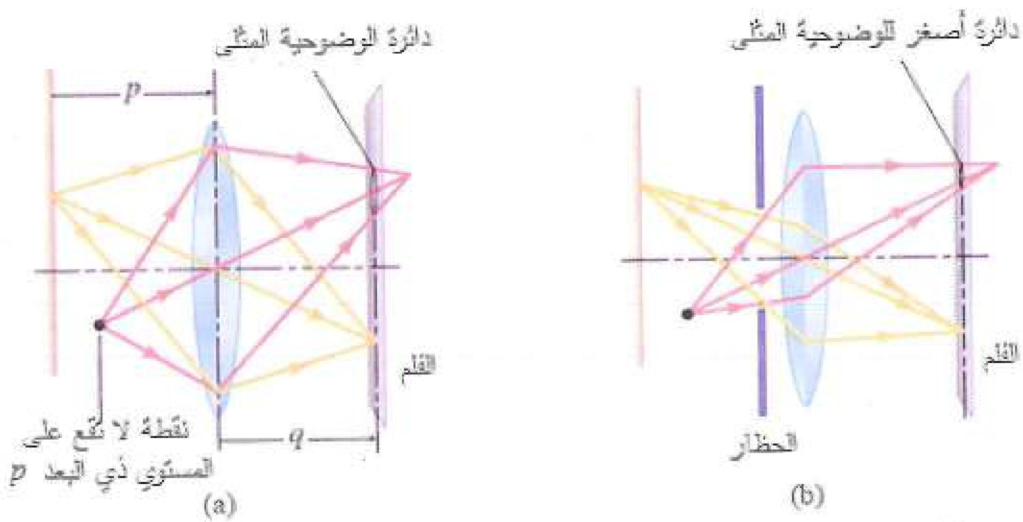
مثال عملي3.1. التصوير عن قرب

لنفرض أن العدسة نفسها تستخدم في مصوّرة قابلة للتعديل لأخذ صورة لجسم على بعد 1.5m. إلى أي بعد عن الفلم يجب نقل العدسة.

ضبط التعرض

يضبط التعرّض الذي يختلف تبعاً للفلم وحساسيته بحظار من الشفرات المعدنية المتداخلة يؤدي دور قزحية العين؛ فهو ينظم أبعاد الفتحة والمغلاق، هو الآلية التي تضبط مدة التعرض – وهي الفاصل الزمني الذي يسمح خلاله للضوء بالمرور من الفتحة. يتم اختيار أبعاد الفتحة ومدة التعرض بحيث يصل إلى الفلم المقدار الصحيح من الطاقة الضوئية. فإذا حدث خطأ في اختيارهما فإن تعرض الفلم يكون أكثر أو أقل مما ينبغي.

عمق الحقل



الشكل3.10. (a) دائرة الإضاءة المثلى في حالة نقطة لا تقع في مستوي التبئير. (b) تخفيض أبعاد الفتحة يخفض دائرة الإضاءة المثلى، ومِن ثَمَّ يزيد عمق الحقل.

عندما يتم تبئير العدسة بضبط بعدها q عن الفلم، فإنه لا تُشَكَّل صور حادة على الفلم إلّا للأجسام الواقعة في مستو على بعد معين p من العدسة. فالأشعة التي تصدر من نقطة على الجسم غير واقعة في

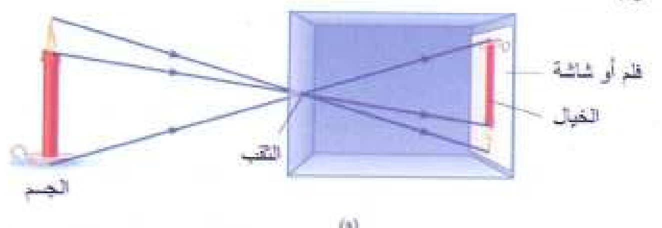
هذا المستوي تعرّض دائرة على الفلم (دائرة الوضوحية المثلى) عوضاً عن نقطة أحادية (الشكل3.10a). في حالة مجال معين من الأبعاد عن المستوي، تكون دائرة الوضوحية المثلى من الصغر بحيث تشكل صورة واضحة بشكل مقبول على الفلم. يدعى هذا المجال من الأبعاد عمق الحقل.

يمكن وضع حظار قبل العدسة لتخفيض أبعاد الفتحة، ومِن ثَمَّ تخفيض أبعاد دائرة الوضوحية المثلى (الشكل3.10b). وهكذا فإن تخفيض أبعاد الفتحة يؤدي إلى زيادة في عمق الحقل. تكمن التسوية في أنه من الضروري إطالة مدة التعرّض في حالة الفتحة الأصغر لتعريض الفلم بشكل صحيح، الأمر الذي يمكن أن يسبب إشكالاً إذا كان الجسم في حالة حركة أو إذا لم يتم تثبيت المصوّرة بشكل جيد. يجب إجراء تسوية بين استخدام فتحة صغيرة-بحيث يتم تبئير معظم الوسط المحيط – واستخدام مدة تعرّض قصيرة بحيث لا تؤدي حركة الجسم أو المصوّرة إلى تشويش الخيال.

المصوّرة ذات الثقب

المصوّرة ذات الثقب pinhole camera أو المصوّرة في الظلام أبسط من المصوّرة بعدسة واحدة. ولتحقيق مصوّرة بثقب، يجعل ثقب صغير في أحد جوانب علبة (الشكل3.11a). يتشكل خيال حقيقي مقلوب في الجهة المقابلة من الصندوق. يمكن لصفيحة تصوير ضوئي (أو صفيحة من الزجاج مطلية بمستحلب حساس ضوئياً) أو فلم موضوعة (موضوع) على الجدار الخلفي أن يسجل الخيال.

استفاد الفنانون من المصوّرة في الظلام بالعمل في حجرة بفتحة صغيرة كانت تسمح بالأشعة الضوئية من مشهد خارج الحجرة. يمكن إسقاط الخيال على قماش تطريز، وكان يمكن للفنان أن يرسم الخطوط العريضة للمشهد على قماش التطريز...ويعد Jan van Eyck و Titian و Caravaggio و Vermeer و Canaletto من الفنانين القلائل من المعروف أو يعتقد أنهم استخدموا مصوّرة الظلام لتحقيق الطبيعية الواقعية realistic naturalism (الشكل3.11b). في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، شاع استخدام مصوّرة الظلام في نسخ الرسوم والمطبوعات.



(a)



الشكل3.11. (a) مصوّرة ذات ثقب صغير. (b) حفلة رسمها Jan Vermeer في نحو عام 1666.

لا تشكل المصوّرة ذات الثقب خيالاً حقيقياً- فالأشعة التي تصدر من نقطة على الجسم لا تتقارب في نقطة واحدة على الجدار. يسمح الثقب لمخروط ضيق من الأشعة المتباعدة من كل نقطة على الجسم؛ يصنع مخروط الأشعة بقعة دائرية صغيرة على الجدار. إذا كانت البقعة صغيرة إلى حد كاف، يبدو الخيال واضحاً بالنسبة للعين. يؤدي ثقب أصغر للحصول على خيال أكثر حدة إضاعته أخفت ما لم يكن الثقب صغيراً جداً حيث يفرق الانعراج البقع بشكل كبير كما سنرى.

فيزياء منزلية1

ثمة طريقة مأمونة لرؤية الشمس عن طريق ترتيب المصوّرة ذات الثقب. (الشكل3.12). وهذه طريقة جيدة لرؤية كسوف الشمس. افتح ثقباً في قطعة من الكرتون أو صفيحة من الورق أو الألمنيوم. ثم أمسك صفيحة بيضاء من الألمنيوم تحت الثقب وانظر إلى أثر الشمس عليها. (تذكر عدم النظر مباشرة إلى الشمس، حتى في أثناء الكسوف؛ يمكن أن يحدث ضرر كبير لعينيك) .



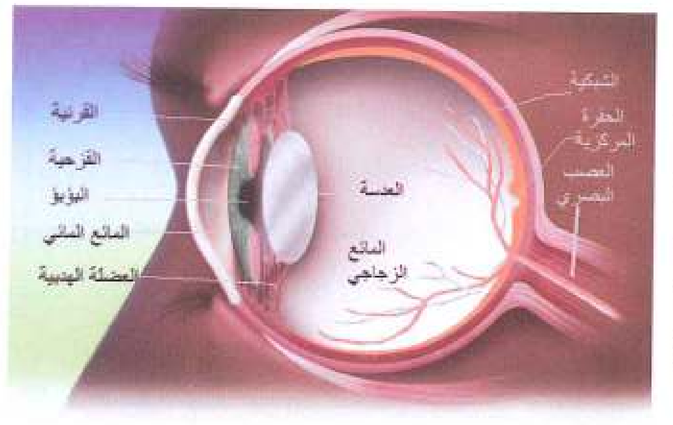
الشكل 3.12. ترتيب المصوّرة ذات الثقب لرؤية كسوف الشمس.

3.2.7. العين

العين البشرية تشبه مصوّرة رقمية. فالمصوّرة تشكل خيالاً حقيقياً على صفيف CCD array؛ وكذلك تشكل العين خيالاً حقيقياً على الشبكية، وهي غشاء يتكون من 125 مليون خلية مستقبلة للضوء (العُصَيّات rods والمخاريط cones) مصفوفة بشكل مناسب؛ ولو أن آلية التقريب مختلفة. في المصوّرة تقترب العدسة من الفلم أو تبتعد عنه لإبقاء الخيال عليه لدى تغير بعد الجسم. أما في العين فتكون العدسة على بعد ثابت من الشبكية ولكن بعدها البؤري قابل للتغيير؛ إذ يعدل البعد البؤري للإبقاء على بعد الخيال ثابتاً لدى تغير بعد الجسم.

يبين الشكل3.13 تشريحية العين. فهي كروية تقريباً، متوسط قطرها 2.5cm. في مقدمة العين بروز مملوء بمائع مائي (أو خلط مائي) ومغطّى من الخارج بغشاء شفاف يدعى القرنية cornea. يتم الإبقاء على زيادة الضغط Overpressure في المائع المائي للإبقاء على البروز قليلاً نحو الخارج. يقوم سطح القرنية المنحني بمعظم عملية انكسار الأشعة الضوئية التي تدخل العين. أما العدسة القابلة للتعديل فتقوم بالتوليف الدقيق. يمكن في معظم الأغراض أن ندرس القرنية والعدسة بأنهما يؤديان دور عدسة واحدة، تبعد نحو 2.0cm عن الشبكية، لها بعد بؤري قابل للتعديل. لرؤية أجسام تقع على بعد 25cm أو يزيد من

العين، وهي حالة الرؤية النظامية، يجب أن يتغير البعد البؤري للعين بين 1.85cm و 2.00cm إذا كانت الشبكية تبعد 2.00cm عن العدسة.



الشكل3.13. تشريحية العين البشرية

يمتلئ الحجم الكروي للعين خلف العدسة بمادة شبيهة بالهلام تدعى المائع الزجاجي vitreous fluid. قرينتا انكسار كل من المائع المائي والزجاجي هي تقريباً نفسها للماء (1.333). أما قرينة انكسار العدسة المكونة من مادة ليفية شبيهة بالهلام، فهي أعلى قليلاً (1.437). أما القرنية فقرينة انكسارها 1.351.

للعين فتحة aperture (بؤبؤ العين pupil) قابلة للتعديل تؤدي دور الحظار في مصوِّرة للتحكم بكمية الضوء التي تدخل العين. تضبط أبعاد بؤبؤ العين بالقزحية iris، وهي نسيج عضلي حلقي (الجزء الملوَّن من العين). تتوسع القزحية في الضوء الشديد لتخفيض أبعاد البؤبؤ والحدِّ من كمية الضوء التي تدخل العين. وتتقلص، في الضوء الخافت، لتسمح بدخول كمية أكبر من الضوء من فتحة العين المتوسِّعة. ويعدُّ توسُّع القزحية وتقلصها ردة فعل استجابة لتغير شدات الضوء. يبلغ قطر البؤبؤ في الضوء العادي 2mm، ونحو 8mm في الضوء الخافت. تتركز الخلايا المستقبلة للضوء في الشبكية بكثافة في منطقة صغيرة جداً تدعى اللطخة الصفراء macula lutea. في الشبكية ثلاثة أنواع مختلفة من المخاريط تستجيب لأطوال موجية ضوئية مختلفة (الشكل3.14). ومِن ثَمَّ فإن المخاريط مسؤولة عن رؤية الألوان. تقع الحفرة المركزية fovea centralis في مركز اللطخة الصفراء، وقطرها 0.25mm، حيث تزدحم فيها المخاريط بشدة، ويقع فيها معظم الرؤية الحادة في الضوء الشديد. من شأن العضلات التي تتحكم في حركة العين أن تؤمن وقوع خيال الجسم المدروس في مركز الحفرة المركزية.

طول موجة الامتصاص الأعظمي (nm)
437 498 533 564
Rods
الشدة النسبية للامتصاص الأعظمي
100 75 50 25 0
400 450 500 550 600 650
الطول الموجي (nm)

الشكل3.14. كيفية اعتماد حساسية العُصَيّات rods والأنواع الثلاثة للخلايا المخروطية على طول موجة الضوء (في الخلاء) الوارد. (العُصَيّات أكثر حساسية بكثير من المخاريط، فإذا كان المحور الشاقولي مطلقاً عوضاً عن أن يكون نسبياً يصبح منحني العُصَيّات أطول بكثير منه للخلايا المخروطية)

فيزياء منزلية2

في كل شبكية بقعة عمياء خالية من العُصَيّات والخلايا المخروطية، تقع حيث يغادر العصب البصري الشبكية. لا تلاحظ البقعة العمياء عادة لأن الدماغ يملأ المعلومات المفقودة. لملاحظة البقعة العمياء، ارسم إشارة + ونقطة بحيث يبعد أحدهما عن الآخر نحو 10cm على صفحة من الورق الأبيض. أغمض عينك اليسرى وأمسك الورقة بعيداً عن عينيك بحيث تكون النقطة إلى اليمين. اجعل عينك تركز على الإشارة + لدى تقريب الورقة ببطء من وجهك. تختفي النقطة عندما يقع الخيال على البقعة العمياء. استمر في تقريب الورقة أكثر من عينك؛ سترى النقطة مرة أخرى عندما يبتعد الخيال عن البقعة العمياء.

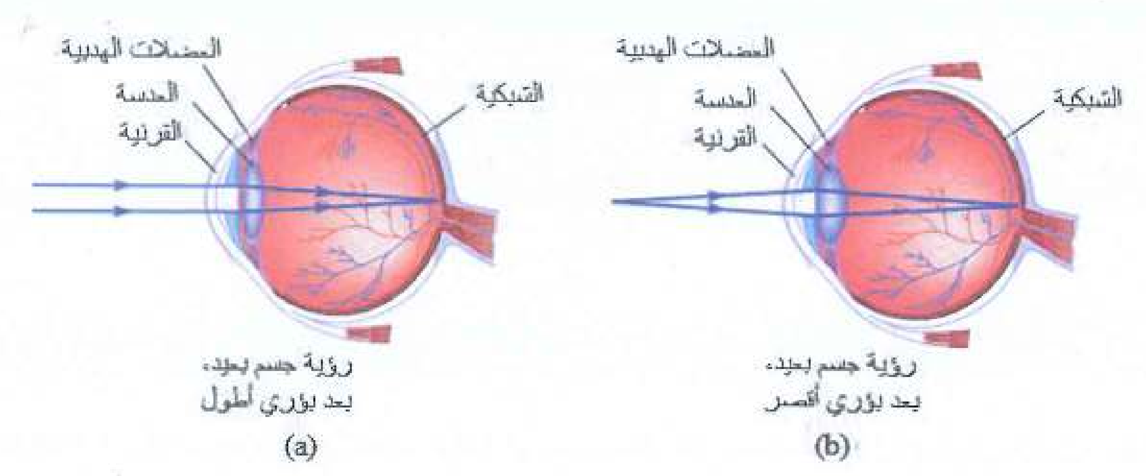
تكون العُصَيّات أكثر حساسية للضوء الخافت من المخاريط، ولكنها لا تتضمن أنواعاً مختلفة حساسة لأطوال موجية مختلفة، ومِن ثَمّ لا يمكننا تمييز الألوان في الضوء الخافت جداً. حيث تكون الخلايا المستقبلة للضوء خارج اللطخة الصفراء أقل كثافة بكثير وكلها من العُصَيّات. غير أنّ كثافة العُصَيّات خارج اللطخة أكبر بكثير منها داخلها. فإذا كنت تحاول رؤية نجم خافت الإضاءة في السماء، فإن ذلك يساعدك على النظر قليلاً إلى جانب النجم، ومِن ثَمّ تقع صورة النجم خارج اللطخة حيث يوجد المزيد من العُصَيّات.

3.2.8. المطابقة

يدعى تغيير البعد البؤري لعدسة العين المطابقة accommodation؛ وهي نتيجة للتغير الفعلي لشكل عدسة العين بفعل العضلات الهدبية. تسمح قابلية تعديل شكل العدسة بالمطابقة من أجل كل أبعاد الجسم عن العين، مع الاستمرار بتشكيل خيال على بعد ثابت من العدسة يتحدد بالفاصل بين العدسة والشبكية. عندما يكون الجسم المنظور بعيداً، تكون العضلات الهدبية مسترخية؛ والعدسة تكون منبسطة نسبياً ورقيقة، الأمر الذي يجعل بعدها البؤري أطول (الشكل3.15a). في حالة الأجسام الأقرب، تقوم العضلات الهدبية بضغط العدسة فتجعلها شكلها مدوّراً أكثر ثخانة (الشكل3.15b) فتجعل بعدها البؤري أقصر.

المطابقة تمكّن العين من تشكيل خيال حاد على الشبكية للأجسام الواقعة على مجال من الأبعاد من نقطة الكثب near point إلى نقطة المدى far point. تقدر نقطة الكثب لدى الشباب بنحو 25cm ونقطة المدى اللانهاية. يمكن أن يكون بعد نقطة الكثب لدى الطفل صغيراً بقدر 10cm. يمكن بنظارات أو عدسات لاصقة أو الجراحة تصحيح العين في حالة نقطة كثب تزيد على 25cm أو نقطة مدى تقل عن اللانهاية. يكتب المبصاريون Optometrists وصفات بدلالة القوة الكاسرة refractive power (p)

عوضاً عن البعد البؤري. تختلف القوة الكاسرة عن قوة التكبير، التي هي مرادف التكبير الزاوي لأداة بصرية). والقوة الكاسرة هي مجرد مقلوب البعد البؤري:



الشكل3.15. البعد البؤري لعدسة العين يكون (a) أطول في حالة الأجسام البعيدة و(b) أقصر في حالة الأجسام القريبة.

$$P = \frac{1}{f} \tag{3.5}$$

تقاس القوة الكاسرة عادة بالكسيرات diopters (ورمزها D). والكسيرة هي القوة الكاسرة لعدسة بعدها البؤري $f = 1m$ $(1D = 1m^{-1})$. بقدر ما يكون البعد البؤري أقصر، تكون قوة العدسة أكبر لأن انحناء الأشعة يكون أكبر. تكون القوة الكاسرة موجبة في العدسات المقربة وسالبة في العدسات المبعدة.

لماذا نستخدم القوة الكاسرة عوضاً عن البعد البؤري؟ عندما تكون عدستان رقيقتان أو أكثر قواها الكاسرة $P_1, P_2, ...$ متقاربة فيما بينها إلى حد كاف، فإنها تسلك سلوك عدسة رقيقة واحدة قوتها الكاسرة

$$P = P_1 + P_2 + ... \tag{3.6}$$

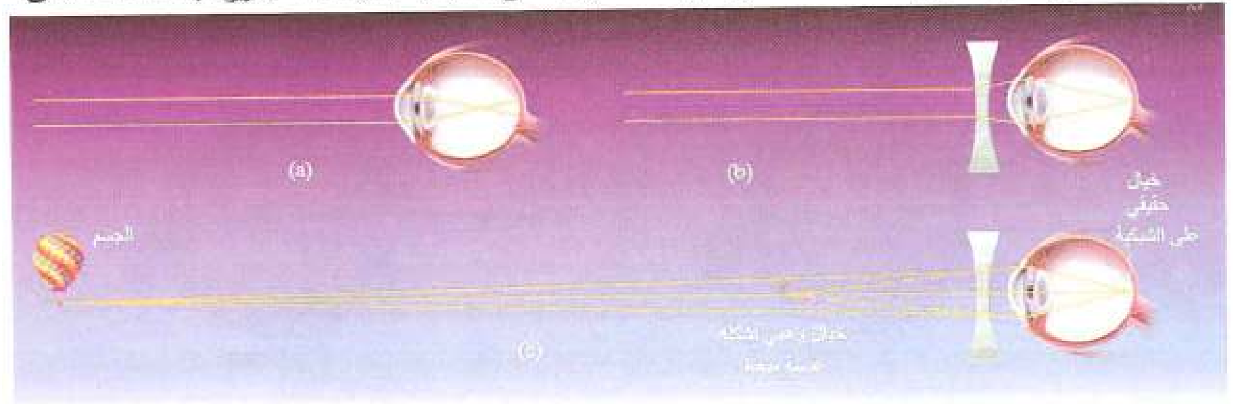
حيث نستبدل P بـ $1/f$

تطبيق: تصحيح حسر البصر (قصر البصر)

يمكن للعين الحسيرة nearsighted eye أن ترى الأجسام القريبة بوضوح، ولكن ليس الأجسام البعيدة. يحدث حسر البصر (أو قصر البصر) عندما يتطاول شكل كرة العين أو لدى وجود إفراط في انحناء القرنية. تشكل العين الحسيرة خيالاً للجسم البعيد أمام الشبكية (الشكل3.16a). حيث تكون القوة الكاسرة للعدسة كبيرة جداً؛ حيث تجعل العين الأشعة تتقارب بسهولة كبيرة جداً. يمكن لعدسة تصحيحية مبعدة (قوتها الكاسرة سالبة) أن تعوض قصر البصر بحني الأشعة خارجياً (الشكل 3.16b).

في حالة الأجسام على أي بعد عن العين، تشكل العدسة التصحيحية المبعدة خيالاً وهمياً أقرب إلى العين من الجسم. ففي حالة جسم في اللانهاية تشكل عدسة التصحيح خيالاً عند نقطة المدى من العين

(الشكل3.16c). في حالة الأجسام الأقل بعداً (أو الأقرب) يكون الخيال الوهمي أقرب منه في حالة نقطة المدى. تستطيع العين تقريب الأشعة الصادرة من هذا الخيال على الشبكية لأنها لا تتجاوز أبداً نقطة المدى.



الشكل3.16. (a) في عين حسيرة، تتقارب الأشعة الواردة من نقطة على جسم بعيد قبل أن تصل إلى الشبكية. (b) تصحح العدسة المبعدة العين الحسيرة (القصيرة البصر) بحني الأشعة نحو الخارج إلى حد يكفي لتقريبها على الشبكية. (c) حيث تشكل العدسة المبعدة خيالاً وهمياً أقرب إلى العين من الجسم؛ يمكن للعين أن تجعل الأشعة الصادرة من هذا الخيال تتقارب في خيال حقيقي على الشبكية. (الأبعاد ليست بمقياس الرسم نفسه).

مثال3.4. تصحيح قصر البصر myopia (العين الحسيرة)

لا يمكن لشخص من دون عدساته اللاصقة أن يرى بوضوح جسماً يبعد عنه أكثر من 40.0cm. ما قيمة القوة الكاسرة التي يجب أن تكون لعدساته لتصبح رؤيته طبيعية؟

طريقة الحل. إن نقطة المدى لعيني الشخص 40.0cm. في حالة جسم في اللانهاية، يجب على عدسة التصحيح أن تشكل خيالاً وهمياً على بعد 40.0cm من العين. نطبق في معادلة العدسة $p=\infty$ و $q=-40.0cm$ لإيجاد البعد البؤري أو القوة الكاسرة لعدسة التصحيح. إن بعد الخيال سالب، لأنه وهمي– وهو يتشكل في جانب الجسم نفسه بالنسبة للعدسة.

الحل. نكتب معادلة العدسة الرقيقة

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}=P$$

ولما كان $p=\infty$ فإن $1/p=0$، ومن ثم $0+\frac{1}{-40.0cm}=\frac{1}{f}$، وبالحل من أجل البعد البؤري نجد:

$f=-40.0cm$. ومن ثم فإن القوة الكاسرة للعدسة مقدرة بالكسيرات تساوي مقلوب البعد البؤري بالأمتار :

$$P=\frac{1}{f}=\frac{1}{-40.0\times10^{-2}m}=-2.50D$$

المناقشة. إن البعد البؤري للعدسة وقوتها الكاسرة سالبان، كما هو متوقع في حالة العدسات المبعدة. ربما نكون قد تنبأنا بأن البعد البؤري يجب أن يساوي $f=-40.0cm$ من دون تطبيق معادلة العدسة الرقيقة.

الأشعة القادمة من منبع بعيد تكون متوازية تقريباً. والأشعة المتوازية التي ترد على عدسة مقربة تبرز وكأنها تنطلق من نقطة بؤرية قبل العدسة. ومِن ثَمَّ فإن الخيال يقع عند النقطة البؤرية في طرف الورود بالنسبة للعدسة.

مثال عملي3.2. ماذا يحدث لنقطة الكثب؟

لنفرض أن نقطة الكثب للشخص (من دون عدساته اللاصقة) تساوي 10.0cm. ما هو أقرب جسم يمكن أن يراه بوضوح وهو مرتدٍ عدساته اللاصقة؟ (تلميح: من أجل أي بعد للجسم تشكل العدسات اللاصقة خيالاً وهمياً قبل العدسات بـ 10.0cm؟)

تطبيق: تصحيح مد البصر Hyperopia **(العين الطامسة)**

يمكن للعين المديدة البصر hyperopic (farsighted) أن ترى بوضوح أجساماً بعيدة، ولكن ليس الأجسام القريبة؛ حيث تكون نقطة الكثب واسعة جداً. القوة الكاسرة للعين صغيرة جداً؛ فالقرنية والعدسة لا تكسر الأشعة إلى حد يكفي لجعلها تتقارب على الشبكية (الشكل3.17a).



الشكل3.17. (a) عين مديدة البصر تشكل خيالاً لجسم قريب وراء الشبكية. (ليس بالمقياس نفسه). (b) عدسة تصحيح مقربة تشكل خيالاً وهمياً أبعد عن العين من الجسم. يمكن للعين أن تقرب الأشعة الصادرة من الخيال الوهمي لتشكيل خيال حقيقي على الشبكية.

تصحح العدسة المقربة مد البصر بحني الأشعة نحو الداخل، ومِن ثَمَّ تتقارب بسهولة أكبر (الشكل3.17b). لتحقيق رؤية نظامية يجب على نقطة الكثب أن تكون على بعد 25cm (أو أقل). ومِن ثَمَّ تشكل عدسة التصحيح لجسم يقع على بعد 25cm من العين، خيالاً وهمياً عند نقطة الكثب).

مثال3.5 تصحيح مد البصر Farsighted Eye

لا يستطيع شخص التركيز على أجسام أقرب من 2.5m من عينيه. ما قوة الكسر التي يجب أن تكون لعدسات التصحيح؟

طريقة الحل. في حالة جسم يبعد 25cm من عيني الشخص، يجب أن تشكل عدسة التصحيح خيالاً وهمياً عند نقطة الكثب لعين الشخص (2.50m من العين). نطبق في معادلة العدسات الرقيقة

$p=25cm$ و $q=-2.50m$ لإيجاد البعد البؤري. بعد الخيال سالب كما في المثال الأخير لأن الخيال يتشكل في جهة الجسم نفسها بالنسبة للعدسة.

الحل. من معادلة العدسة الرقيقة:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$$

نعوض $p=0.25m$ و $q=-2.50m$

$$\frac{1}{0.25}+\frac{1}{-2.50}=\frac{1}{f}$$

وبالحل من أجل البعد البؤري نجد $f=0.28m$. ومِن ثَمَّ فإن قوة الكسر $P=\frac{1}{f}=+3.6D$.

المناقشة: يفترض هذا الحل أن عدسة التصحيح قريبة جداً من العين، كما في حالة العدسات اللاصقة. فإذا كان الشخص يرتدي نظارات تبعد 2.0cm من عينيه فإن بعدي الجسم والخيال اللذين يجب أن نأخذهما في الحسبان –لأنهما يقاسان من العدسة – هما $p=23cm$ و $q=-2.48m$. ومِن ثَمَّ تعطي معادلة العدسات الرقيقة $P=+3.9D$

مثال عملي3.3. استخدام النظارات

يمكن لرجل أن يرى بوضوح جسماً يبعد 2.00m (أو أكثر) من دون ارتداء نظارات. فإذا كانت القوة الكاسرة للنظارات $+1.50D$، فما هو أقرب بعد عن النظارات يمكن أن يكون للجسم، بحيث يستمر الرجل في رؤيته؟ افرض أن النظارات تبعد 2.0cm من العين.

3.3. الضوء الفيزيائي أو الموجي

برز هذا النموذج للضوء نتيجة فشل الضوء الهندسي في تفسير ظواهر غير الانعكاس والانكسار وتخالف النظرية الجسيمية لنيوتن، كالانعراج Diffraction، الذي يتمثل في حيود الضوء عن الانتشار المستقيم، في أثناء عبوره فتحة ضيقة، وكذلك التداخل Interference الذي يؤدي ضمن شروط معينة إلى ظلام ناتج عن ضم حزمتين ضوئيتين إحداهما للأخرى، في حين تتوقع نظرية نيوتن ازدياد الشدة في هذه الحالة دائماً.

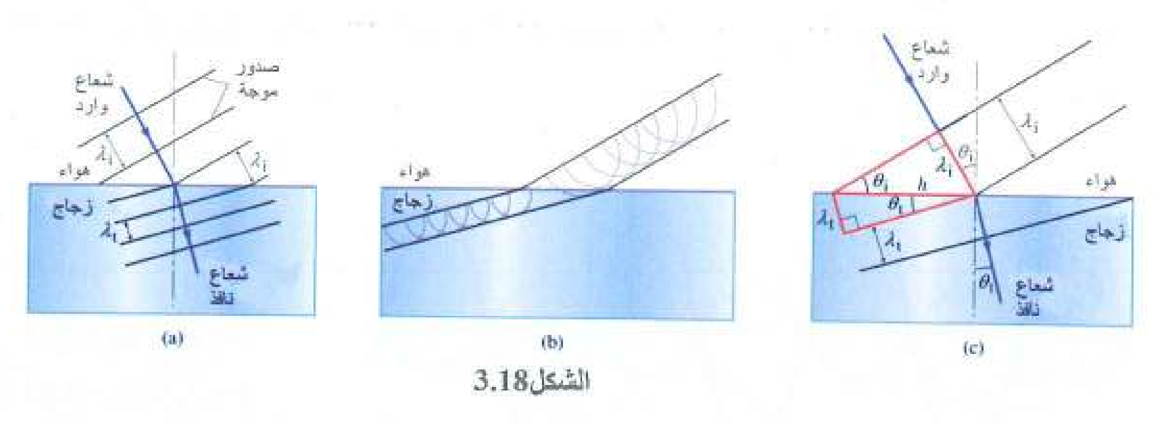
تمثّل الموجة وفقاً لهذا النموذج انتشار اضطراب معين. يمكن أن يمثل هذا الاضطراب تغيرات في الضغط من نقطة إلى أخرى عن قيمة وسطية كما في انتشار الأمواج الصوتية؛ أو تغيرات في قيمة الحقل الكهربائي أو المغنطيسي من موقع لآخر كما في انتشار الأمواج الكهرطيسية التي يشكل الضوء جزءاً منها كما تبين معادلات مكسويل.

يمكن لأي نوع من الأمواج أن يبدي ظاهرتي التداخل والانعراج؛ لأنهما تمثلان مبدأ الانضمام الذي ينص على أن الاضطراب في أي نقطة العائد لموجتين أو أكثر هو مجموع الاضطرابات العائدة لكل موجة على حدة. والانضمام ليس مبدأ جديداً للضوء. يستخدم في دراسة الأمواج الصوتية والأمواج الميكانيكية الأخرى. كما يستخدم أيضاً لإيجاد الحقلين الكهربائي والمغنطيسي العائدين لأكثر من منبع؛ والحقلان الكهربائي والمغنطيسي هما مجموعان شعاعيان عائدان لكل منبع على حدة. والآن نطبق مبدأ الانضمام على الأمواج الكهرطيسية.

تعتمد النظرية الموجية عموماً اعتماداً كبيراً على الطور وفرق الطور للأمواج المتباينة. يعطى الطور في الحركة الجيبية على شكل مجموع حدين كما في المعادلة:

$$D(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \qquad (15.25b)$$

ويلاحظ أن الحد الأول يعبر عن دورية مكانية وسيطها الطول الموجي λ أو العدد الموجي $k = 2\pi/\lambda$ ، والحد الثاني يعبر عن دورية زمانية وسيطها الدور T أو التواتر $\omega = 2\pi/T$. ويمكن للتبسيط تعقب إحدى الدوريتين فنقول على سبيل المثال: إن منحني النقاط المتساوية الطور في لحظة معينة له شكل معين كأن يكون مستوياً، فنقول: إنّ الأمواج المنتشرة مستوية؛ أو كروياً كالأمواج الصادرة عن منبع نقطي، وهو ما يدعى بصدر الموجة. وتعود المسألة إلى كيفية الحصول على صدر موجة جديد بدءاً من معرفتنا بصدر موجة حالي، وهو مبدأ هويغنز Huygens's principle. ينص مبدأ هويغنز (الشكل3.18) على اعتبار كل نقطة من نقاط صدر الموجة منبعاً ثانوياً يصدر مويجات معينة بالفاصل الزمني بين صدري موجة متتاليين، وأنه يمكن الحصول على صدر الموجة الجديد برسم مغلّف هذه المويجات.



الشكل3.18

يمكن بالاعتماد على هذا المبدأ نفسه شرح الانكسار والانعكاس كما يظهر في الشكل3.18، وتكون الأشعة المستعملة في الضوء الهندسي هي المستقيمات العمودية على صدر الموجة في كل نقطة منه:

وإذا كان المطلوب معرفة تأثير صدر الموجة لمنبع معين في نقطة معينة وجب، حسب هويغنز، ضم الضوء من كل هذه المنابع النقطية، وأن يؤخذ في الحسبان فروق الطور العائدة لمختلف المسارات

المقطوعة التي تسمى فروق المسير في الحالة المكانية. ومِن ثَمَّ لدينا انضمام الأمواج من عدد لا نهائي من المنابع عوضاً عن عدد صغير من المنابع. وعلينا أن نراعي الفروق الزمنية أيضاً وما إذا كانت تصدر متواقتة أم لا، إضافة إلى السؤال عما إذا كانت المنابع والتغيرات الزمنية فيها مترابطة أم مستقلة بعضها عن بعض.

3.3.1. التداخل وتجربة شقا يانغ

للتداخل أهمية كبيرة في قياس قرائن انكسار الغازات. تستخدم في التداخل موجتان مترابطتان coherent، ونقول إنهما مترابطتان إذا كانتا تحافظان على علاقة طورية ثابتة بينهما (الأمواج من المنبع نفسه). خلافاً لذلك تكون الموجتان غير مترابطتين (الموجتان من منبعين مختلفين).

يحدث التداخل البنّاء Constructive interference بين موجتين عندما يكون لهما الطور نفسه. ولكي يكون لهما الطور نفسه يجب أن تحقق نقاط الموجة العلاقة $\Delta\varphi=(2\pi)\text{m}$، حيث m عدد صحيح. عندما تكون الأمواج المترابطة لها الطور نفسه، فإن السعة الحاصلة تساوي تماماً مجموع السعات الفردية (الشكل 3.19). يعتمد المحتوى الطاقي للموجة على A^2ومِنَّ ثَمَّ $I\propto A^2$.

فتكون السعة والشدة المحصلتان:

$$A=A_1+A_2$$

$$I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}$$

وإذا كانت الشدتان متساويتين تكون الشدة المحصلة $4I_1$

الشكل3.19

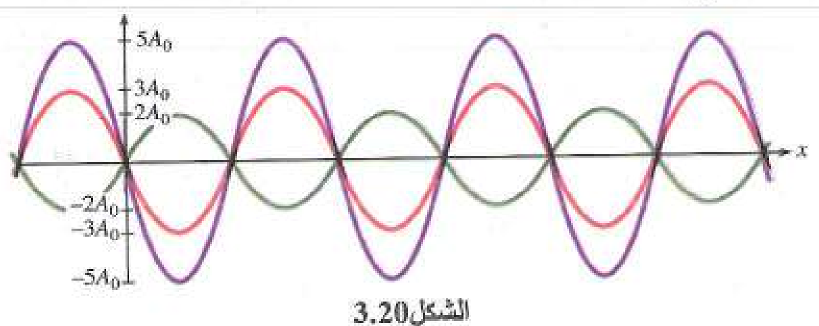
يحدث التداخل الهدّام Destructive interference بين موجتين إذا كان فارق الطور بينهما مقدار نصف دورة فتكونان على تعاكس. وللتعاكس في الطور بين موجتين يجب أن يكون للنقاط على الموجة $\Delta\varphi=(2\pi)(\text{m}+\frac{1}{2})$، حيث m عدد صحيح.

فتكون السعة والشدة المحصلتان (الشكل3.20):

$$A=|A_1-A_2|$$

$$I=I_1+I_2-2\sqrt{I_1I_2}$$

وإذا كانت الشدتان متساويتين تنعدم الشدة المحصلة I (ظلام).



الشكل3.20

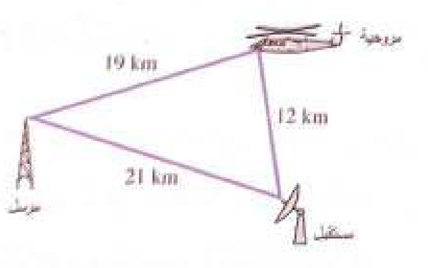
يمكن لموجتين مترابطتين أن تختلفا في الطور عندما تسيران مسافتين مختلفتين إلى نقطة المراقبة. تمثل المسافة الإضافية Δl التي يترتب على الموجة من S_2 أن تنتقلها للوصول إلى النقطة P $\Delta l = d\sin\theta$ (الشكل3.21).

الشكل3.21

فعندما تنتقل الموجتان في الوسط نفسه يكون شرطا التداخل:

في حالة التداخل البناء $\Delta l = m\lambda$، حيث m عدد صحيح. وفي حالة التداخل الهدام يكون $\Delta l = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda$، حيث m عدد صحيح.

مثال3.6. مرسل 60.0kHz يرسل موجة كهرطيسية إلى مستقبل على بعد 21km. تنتقل الإشارة أيضاً إلى المستقبل بطريق آخر، حيث تنعكس عن مروحية. افرض أنه يحدث انزياح في طور الموجة قدره 180° لدى انعكاسها، وهذه قاعدة عامة عندما يحدث الانعكاس عن سطح يفصل بين وسطين قرينة انكسار وسط الورود (الأول) أصغر من قرينة انكسار الوسط الثاني.



(a) ما طول الموجة الكهرطيسية.

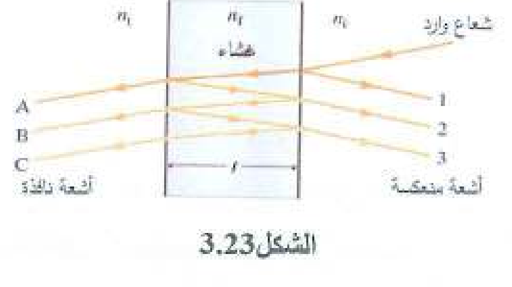
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0\times10^5\,\text{km/sec}}{60\times10^3\,\text{Hz}} = 5.0\text{km}$$

(b) هل تعطي هذه الحالة تداخلاً بناء أم هداماً أم بينهما؟

الحل. إن فرق المسير يساوي $\Delta l = 10\,\text{km} = 2\lambda$، وهو عدد صحيح من الأطوال الموجية. ولوجود انزياح في الطور قدره 180° سيكون التداخل هداماً.

3.3.1.1. التداخل في الأغشية الرقيقة

عندما ينعكس شعاع وارد عن سطح وسط قرينة انكساره أعلى من قرينة انكسار وسط الورود، تنقلب الموجة المنعكسة (يتدخل انزياح في الطور قدره 180° وهذا لا يحدث عندما يرد الضوء من وسط قرينة انكساره أعلى).



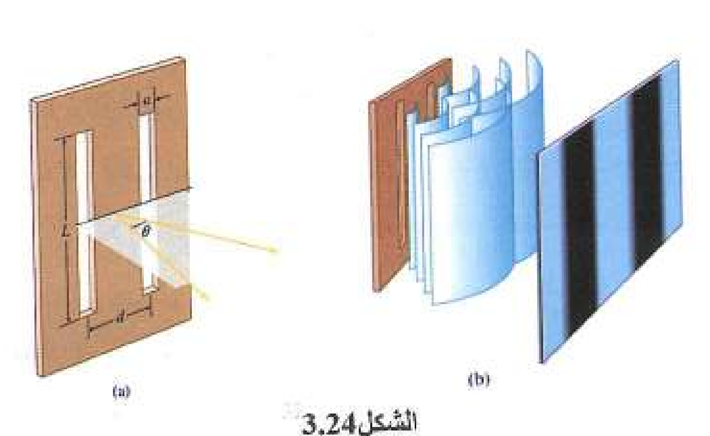
الشكل3.23

يمكن لشعاع أن ينعكس في الوسط عدداً كبيراً من المرات (الشكل3.23). فإذا جمعت الأشعة المنعكسة أو البارزة (النافذة) ستكون نتيجة الجمع إضاءة أو ظلام وفق فروق المسير بينها، وتكون الحزمتان البارزة والمنعكسة متتامتين بالشدة، فإذا كانت الحزمة المنعكسة مضاءة تكون الحزمة البارزة مظلمة. يضاف إلى ذلك أنه إذا تحقق شرط الإضاءة فإنه سيتحقق من أجل طول موجي معين وثخانة معينة للغشاء، ومِن ثَمّ

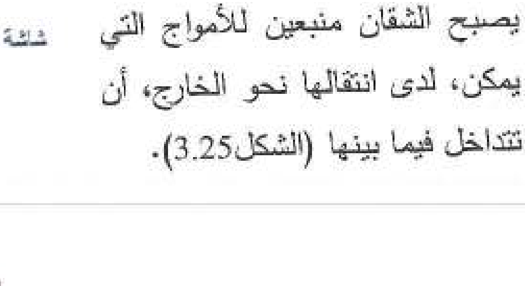
فإنه لن يتحقق بالنسبة للأطوال الموجية الأخرى وستظهر ألوان مختلفة إذا أضيء الغشاء بلون مركب، لتغير قرينة الانكسار بتغير الطول الموجي.

3.3.1.2. تجربة شقا يانغ

يوضع في تجربة شقا يانغ Young's Double-Slit Experiment منبع من الضوء خلف قناع فيه شقان شاقوليان. طول كل من الشقين L، ويفصل البعد d بين مركزيهما، وعرض كل منهما a (الشكل3.24).



الشكل3.24



يصبح الشقان منبعين للأمواج التي يمكن، لدى انتقالها نحو الخارج، أن تتداخل فيما بينها (الشكل3.25).

شاشة
صدور موجة مستوية
D
θ
x
λ
(c)

الشكل3.25

نموذج التداخل الذي يظهر على الشاشة

يتضمن تناوباً من البقع المضيئة والمظلمة

منحني شدة إضاءة البقع

(a) (b)

الشكل3.26

تحدث البقع المضيئة حيث يكون التداخل بناء(الشكل3.26):

$$\Delta l = d\sin\theta = m\lambda$$

حيث m عدد صحيح ويدعى رتبة التداخل "order". في حين تحدث البقع العاتمة حيث يكون التداخل هداماً:

$$\Delta l = d\sin\theta = \left(m+\tfrac{1}{2}\right)\lambda$$

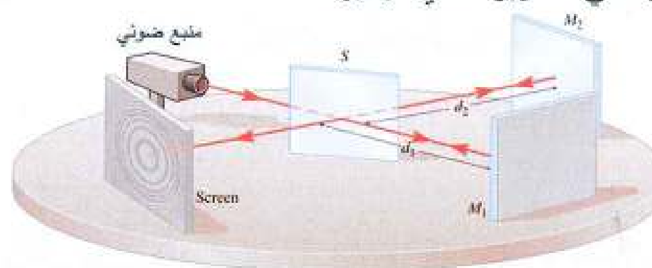
وتلاحظ ضرورة أن تكون d من رتبة الطول الموجي ولاسيّما إذا كان الضوء غير مترابط، بينما يصبح هذا الشرط أقل تقييداً إذا كان الضوء مترابطاً كضوء ليزر.

تعتمد طريقة قياس قرائن انكسار الغازات على جعل الغاز الذي يراد قياس قرينة انكساره في مسار إحدى الموجتين المترابطتين، والإبقاء على الهواء في مسار الأخرى فتنزاح أهداب التداخل لاختلاف فرق المسير الضوئي بين الحزمتين الذي يساوي حاصل ضرب المسار الهندسي بقرينة الانكسار في هذه الحالة.

3.3.2. مقياس مايكلسون التداخلي

مقياس مايكلسون التداخلي Michelson interferometer ذو أهمية كبيرة في قياس استوائية السطوح ومعايرة الأطوال، كما يستخدم في العديد من طرائق التصوير الليزرية المأمونة في الطب كالـ OCT (التصوير المقطعي للترابط الضوئي) التي اشتهرت في تصوير الشبكية والـ Acousto-Optic (تعتمد على وسم الضوء بنبضة فوق صوتية) التي اشتهرت في تصوير الثدي، وغيرها.

يتكون مقياس مايكلسون التداخلي كما هو مبين في الشكل3.27 من منبع ضوئي (ليزر في حالة تصوير النسج)، ومن شاطر (مجزئ) لحزمة المنبع الضوئي beam splitter إلى نصفين متساويي الشدة.



الشكل3.27

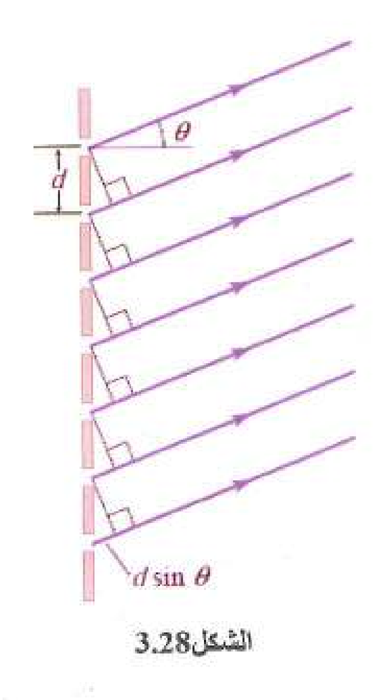
عندما ترد حزمة الضوء المترابط إلى مجزئ الحزمة، ينفذ منه نصف الحزمة إلى المرآة M_1 وينعكس النصف الآخر نحو المرآة M_2. تنعكس الحزمتان الضوئيتان عن المرآتين، لتنضم إحداهما للأخرى وتظهران على الشاشة. إذا كانت ذراعا مقياس التداخل مختلفتين في الطول، يمكن أن يظهر فرق في الطور بين الذراعين على شكل انزياح في أهداب التداخل.

3.3.3. شبكات الانعراج

لشبكات الانعراج diffraction gratings أهمية كبيرة في المطيافية الضوئية. تتكون شبكة الانعراج (الشكل3.28) من عدد كبير من الشقوق المتوازية والمتساوية الأبعاد. تعد النهايات العظمى (الأهداب المضيئة) التي نحصل عليها بمثل هذه الشبكة تطبيقاً من تطبيقات التداخل، ولكن بين عدد كبير من الأمواج المترابطة والصادرة من العدد نفسه من الشقوق، وقد سميت شبكة انعراج لحدوث انعراج (كما سنرى) عند كل شق من شقوقها. يمكن التعرف على خصائص الشبكة من خلال المثال الآتي.

مثال3.7. ضوء أحمر طوله الموجي $\lambda = 650\ \text{nm}$، يمكن أن يرى بثلاث مراتب في شبكة معينة. كم تدريجة في السنتمتر تقريباً تتضمن الشبكة؟

من أجل كل نهاية نحصل على النهايات العظمى عندما يكون $d \sin\theta = m\lambda$، حيث $m = 0,1,2,3,4..$



الشكل3.28

$$d\sin\theta_0 = 0$$
$$d\sin\theta_1 = 1\lambda$$
$$d\sin\theta_2 = 2\lambda$$
$$d\sin\theta_3 = 3\lambda$$
$$d\sin\theta_4 = 4\lambda$$

المرتبة الثالثة تلاحظ

ولكن المرتبة الرابعة لا تلاحظ.

لما كانت حالة $m=4$ لا تلاحظ، لا بد أن يكون $\sin\theta_4 > 1$.

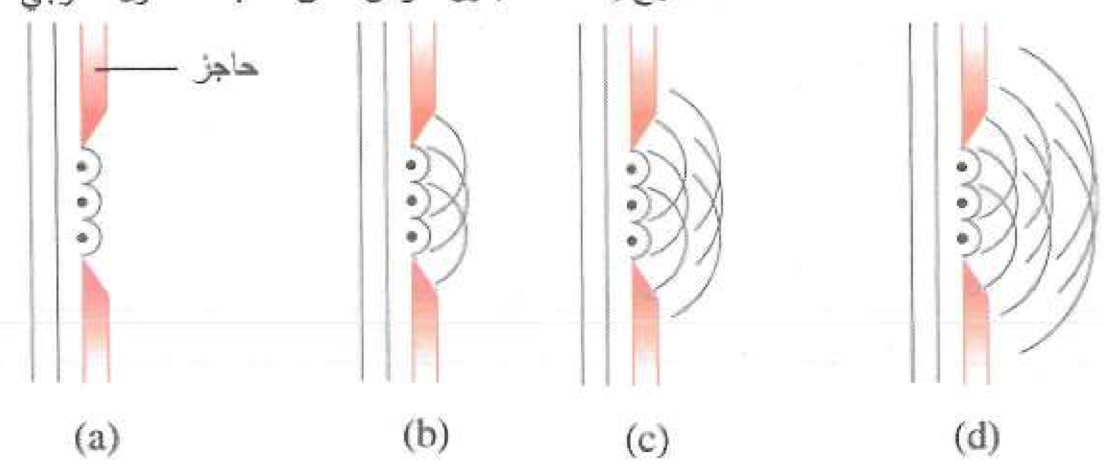
يمكن أن نفترض في هذه الحالة أن $\theta_3 \approx 90^\circ$. الأمر الذي يعطي

$$d = 3\lambda = 1.95\times10^{-6}\,\text{m}$$

و $N = \frac{1}{d} = 510{,}000\ \text{lines/m} = 5100\ \text{lines/cm}$

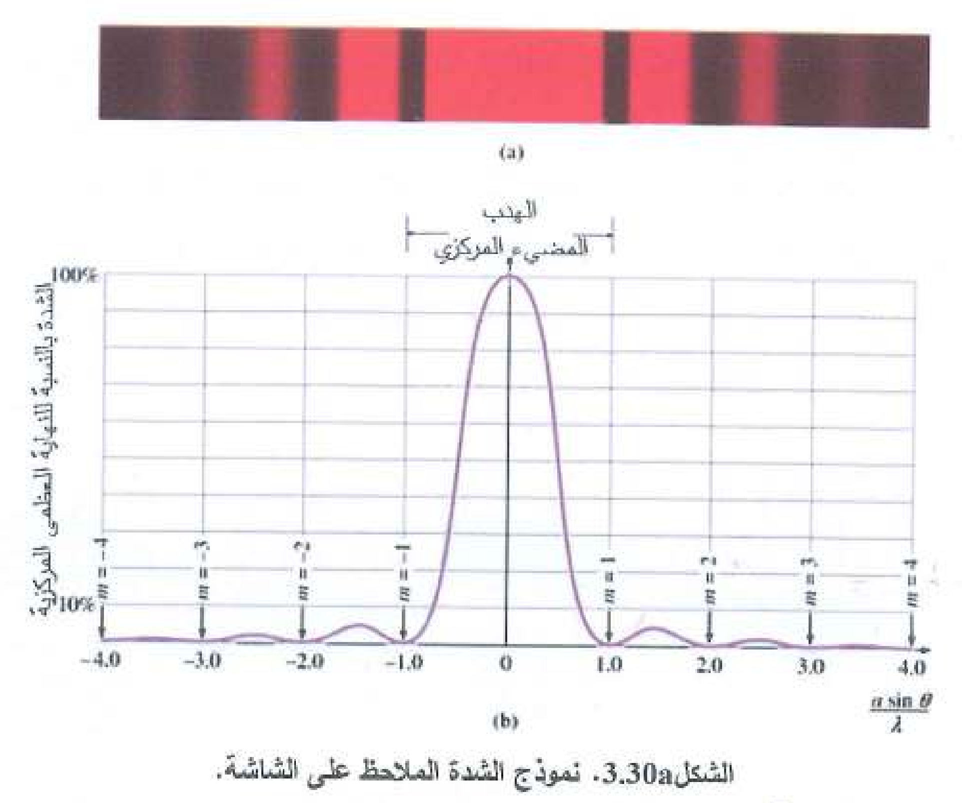
3.3.6. الانعراج

يمكن شرح الانعراج بصورة مشابهة للتداخل بعد تقسيم صدر الموجة إلى شرائط متساوية الشدة واعتبارها منابع لتجمع الأجزاء المكشوفة عن الشق الذي ندرس الانعراج له، (الشكل3.29) وذلك باستخدام مبدأ هويغنز: إذْ تعد كل نقطة على صدر موجة منبعاً للمويجات؛ سوف يتوسع عرض الضوء عندما ينتشر من خلال شق ضيق. لا يلاحظ الانعراج إلّا عندما يكون عرض الشق له أبعاد الطول الموجي نفسها.

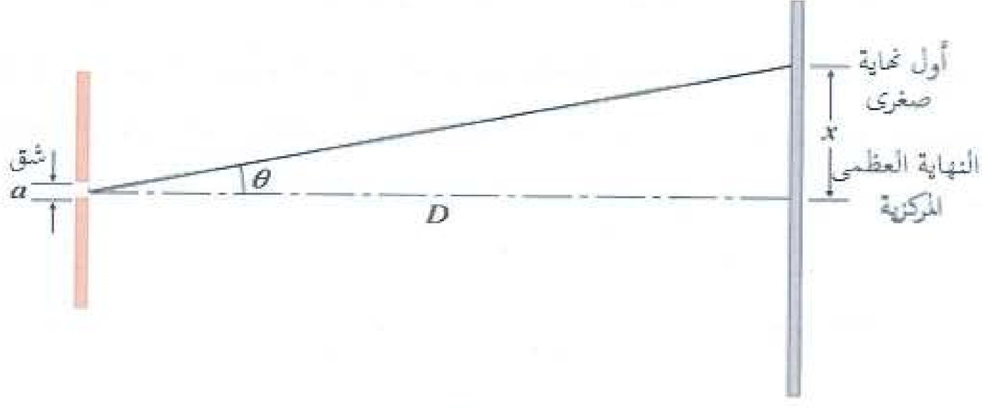


الشكل3.29

تحدث النهايات الصغرى minima عندما $a\sin\theta = m\lambda$، حيث $m = \pm1, \pm2, ...$. انظر الشكل3.30 مع الانتباه أن الجمع من طرفي الشق. ويلاحظ أنه من أجل طول موجي معين تزداد الزاوية θ مع نقصان عرض الشق a، وتبتعد أهداب الانعراج عن المركز حتى تصبح مهملة وكأنه لدي منبع حقيقي قائم بذاته.



الشكل3.30a. نموذج الشدة الملاحظ على الشاشة.



الشكل3.30b

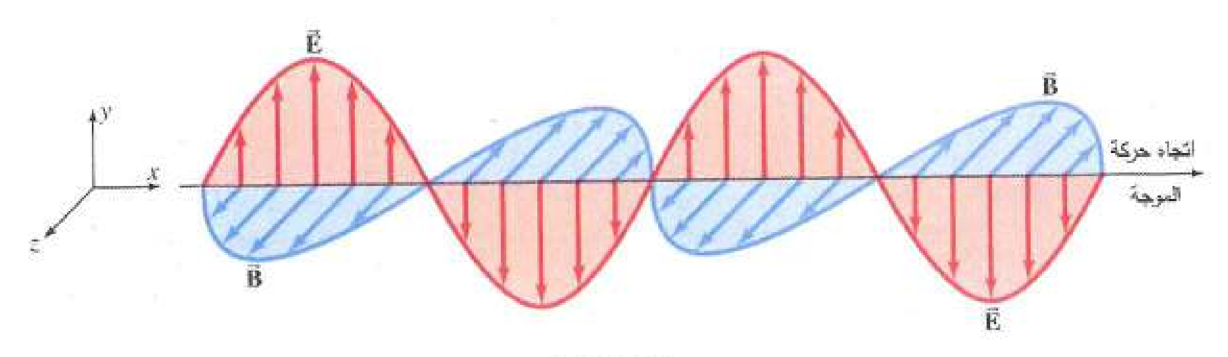
المقدرة الفاصلة للأجهزة البصرية

يكمن مفعول انعراج الضوء في توسيع عرض انتشاره وتوزع الشدة. يمكن لدى رؤية جسمين بعيدين، أن يتسع عرض انتشارهما إلى حيث يتراكب خيالا كل من الجسمين، فيصبح الجسمان غير قابلين للتمييز، ويرتكز معيار رايلي للمقدرة الفاصلة على أن النهاية العظمى للهدب المركزي الثاني تقع عند النهاية الصغرى للأول.

3.4. الضوء موجة كهرطيسية

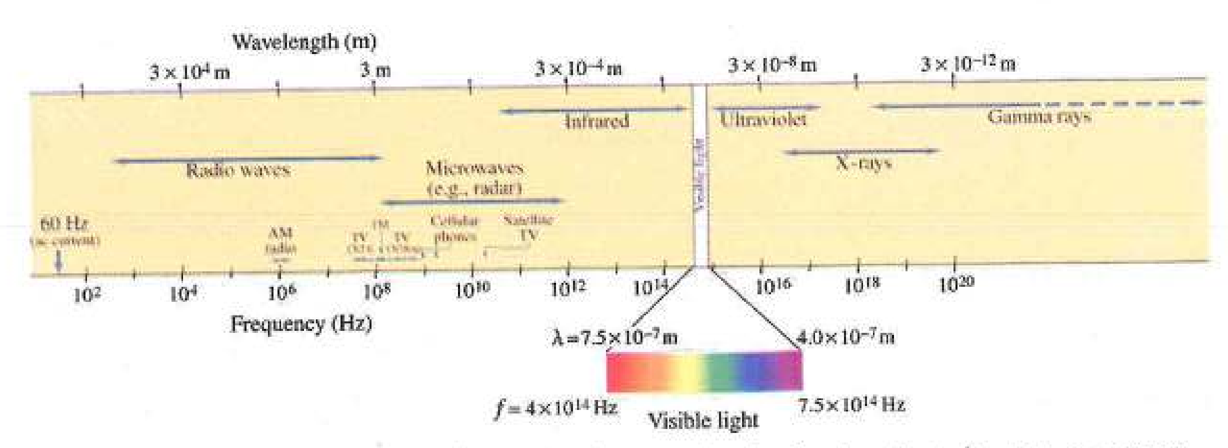
تبين لدى دراسة انتشار الضوء في المواد الصلبة أن الضوء موجة كهرطيسية، حيث ظهرت معادلة انتشار للضوء تشبه معادلة انتشار الأمواج الكهرطيسية التي نشأت عن نظرية ماكسويل التي جمعت كل

ما هو معروف عن خصائص الشحنات الكهربائية والحقول التي تصدرها في حالة السكون أم الحركة، وربطت بين الشحنات الكهربائية والتيارات الكهربائية والحقول الكهربائية والمغنطيسية الصادرة منها. فجمعت قوانين أمبير وفاراداي وغيرها من القوانين المعروفة حتى زمن مكسويل. كما تبين لدى حساب سرعة انتشار الأمواج الكهرطيسية في الخلاء أنها تساوي سرعة الضوء. كما أمكن تفسير استقطاب الضوء انطلاقاً من معرفة أن الموجة الكهرطيسية تتكون من حقلين كهربائي $\vec{E}$ ومغنطيسي $\vec{B}$ متعامدين وعموديين على جهة الانتشار.



الشكل 3.31

وقد كان هرتز أول من قام بتوليد الأمواج الكهرطيسية والكشف عنها باستخدام معدات كهربائية بسيطة. وقد تبين لاحقاً أن هذه الأمواج تنتشر بسرعة الضوء $c=3\times10^{8}m/s$، وأنها تبدي خصائص الضوء كالانعكاس والانكسار والتداخل. وقد كان الفارق الوحيد بينها وبين الضوء أنها لم تكن مرئية حين انتشارها.



الشكل 3.32. طيف الأمواج الكهرطيسية يظهر التواترات والأطوال الموجية المقابلة لمختلف المجالات (في الهواء).

تتكون الموجة الكهرطيسية من مركبتين إحداهما لحقل كهربائي E والأخرى لحقل مغنطيسي B متعامدتين فيما بينهما، ويتحرك النموذج بكامله في اتجاه عمودي على الحقلين.

تقع الأطوال الموجية للضوء المرئي بين $4.0\times10^{-7}m$ و $7.5\times10^{-7}m$ أو من $400nm$ إلى $750nm$ ($1nm=10^{-9}m$). يمكن إيجاد تواترات هذه الأمواج باستخدام العلاقة $c=\lambda\cdot f$، حيث λ و f طول الموجة وتواترها على الترتيب. تخبرنا هذه المعادلة بأن تواترات الضوء المرئي تقع بين $4.0\times10^{14}Hz$ و $7.5\times10^{14}Hz$ (تذكر أن $1\text{Hz}=1\text{cycle}/s=1s^{-1}$). غير أنّ الضوء المرئي ليس إلّا جزءاً من طيف الإشعاعات الكهرطيسية. فالأمواج الكهرطيسية التي تتميز بالتواتر $10^{9}Hz$ تدعى الأمواج الراديوية نظراً لاستخدام تواترات تقع حول هذا المجال في بث إشارات الراديو والتلفزيون. ولقد تم التوليد والكشف عن الأمواج الكهرطيسية أو كما نطلق عليها أحياناً إشعاع الأمواج الكهرطيسية في مجال واسع من التواترات. تصنف عادة على النحو المبين في الشكل 3.32، والمعروف بالطيف الكهرطيسي.

يمكن توليد أمواج الراديو والأمواج المكروية microwaves كما ذكرنا باستخدام معدات كهربائية. تتولد الأمواج الكهرطيسية ذات التواترات الأعلى وأنواع أخرى من الأمواج الكهرطيسية بعمليات طبيعية كالإصدار من الذرات والجزيئات والنوى. كما يمكن أن تتولد الأمواج الكهرطيسية بتسارع الإلكترونات أو جسيمات أخرى مشحونة كالإلكترونات المتسارعة في الهوائي. ثمة مثال آخر هو الأشعة السينية التي تتولد أثناء تباطؤ الإلكترونات المتحركة بسرعة لدى سقوطها على هدف معدني.

سنصادف لاحقاً أنواعاً مختلفة من الأمواج الكهرطيسية. غير أنّه يجدر بالذكر هنا أن الإشعاع تحت الأحمر IR infrared radiation (أمواج كهرطيسية تواتراتها أخفض بقليل منها في حالة المجال المرئي) مسؤول بشكل رئيسي عن المفعول الحراري للشمس. فالشمس لا تصدر المجال المرئي فحسب، بل كميات كبيرة من الإشعاع تحت الأحمر وفوق البنفسجي UV ultraviolet أيضاً. تسعى الجزيئات في نسيج جلدنا لأن تتجاوب مع التواترات تحت الحمراء، ومِنْ ثَمَّ فهي تفضل امتصاصها، فتشعرنا بالدفء. نحن البشر يختلف تفاعلنا مع الأمواج الكهرطيسية تبعاً لأطوالها الموجية. فعيوننا تكشف الأطوال الموجية الواقعة في المجال المرئي $4.0\times10^{-7}m$ و $7.5\times10^{-7}m$ أو من $400nm$ إلى $750nm$، بينما يكشف جلدنا الأطوال الموجية الأطول IR. هناك أنواع من أمواج كهرطيسية كثيرة لا يمكن الكشف عنها مباشرة.

مثال 3.8. احسب الطول الموجي لموجة كهرطيسية (a) تواترها 60Hz و(b) لموجة تواتر راديوي FM 93.3MHz و(c) لحزمة ليزرية في المجال المرئي تواترها $4.74\times10^{14}\text{Hz}$.

الحل. (a) $\lambda=c/f=3.00\times10^{8}\text{ms}^{-1}/60s^{-1}=5\times10^{6}m$ أو $5000km$، حيث 60Hz تواتر التيار المتناوب في الولايات المتحدة، والطول الموجي الواحد يمتد على قارّة بأكملها .

(b) $\lambda=c/f=3.00\times10^{8}\text{ms}^{-1}/93.3\times10^{6}s^{-1}=3.22m$، يقدر طول هوائي موجة الـ FM (التواتر المكيف modulated frequency) بنحو نصف طول هذه الموجة.

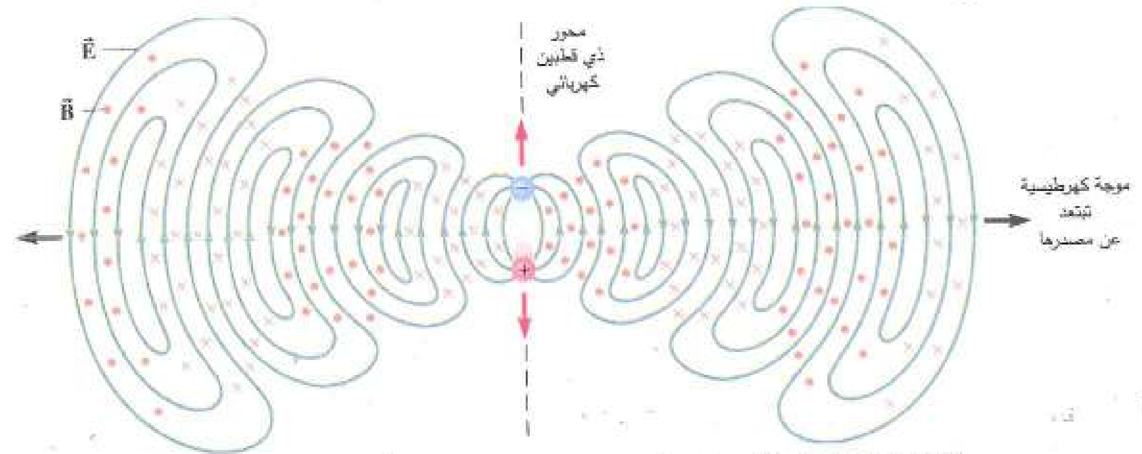
$\lambda = c/f = 3.00\times10^{8}\,\mathrm{ms}^{-1}/4.74\times10^{14}s^{-1} = 6.33\times10^{-7}m = 633nm$ (c)

تمرين. ما تواتر كل من (a) موجة تواتر راديوي طولها الموجي 80m و(b) أشعة سينية طولها الموجي $5.5\times10^{-11}m$؟

3.5. معادلات ماكسويل والأمواج الكهرطيسية

نذكر في هذه الفقرة كيف جمعت معادلات مكسويل جميع القوانين الكهربائية والمغنطيسية المعروفة حتى عهد مكسويل بصورة موجزة. فمن المعروف أن الشحنة الثابتة تولد حقلاً كهربائياً، وأن الشحنة المتحركة بسرعة معينة تولد حقلين: كهربائياً ومغنطيسياً. أما الشحنة المسرَّعة فتولد حقلين كهربائياً ومغنطيسياً متغيرين. يشكل هذان الحقلان الأمواج الكهرطيسية electromagnetic EM waves.

فإذا كانت الشحنة تهتز بتواتر f يكون للموجة الكهرطيسية المتولدة التواتر نفسه. وإذا توقفت الشحنة عن الاهتزاز، تكون الموجة الكهرطيسية نبضة (موجة محدودة الأبعاد). يبين الشكل3.33 خطوط الحقلين الكهربائي والمغنطيسي المتولدة عن ذي قطبين كهربائي مهتز oscillating dipole. تمثل الخطوط الخضراء خطوط الحقل الكهربائي (ويكون الحقل الكهربائي في كل نقطة من الخط مماساً له) في مستوي الورقة. أما النقاط البرتقالية وإشارات الضرب فتمثل خطوط الحقل المغنطيسي التي تعبر مستوي الورقة. تصدر خطوط الحقل من ذي القطبين break free of the dipole، وتنتشر مبتعدة عنه على شكل موجة كهرطيسية. تصبح الحقول بعيداً عن ذي القطبين أقوى في الاتجاهات العمودية على محور ذي القطبين، وأضعف وفق محوره.



الشكل3.33. ذو قطبين كهربائي مهتز تصدر عنه موجة كهرطيسية مبتعدة

3.5.1. معادلات ماكسويل

قانون غاوس. ينص قانون غاوس Gauss's law في الكهرباء على أن الحقول الكهربائية (غير المتحرضة) لا بد أن تبدأ على الشحنات الموجبة وتتوقف في الشحنات السالبة.

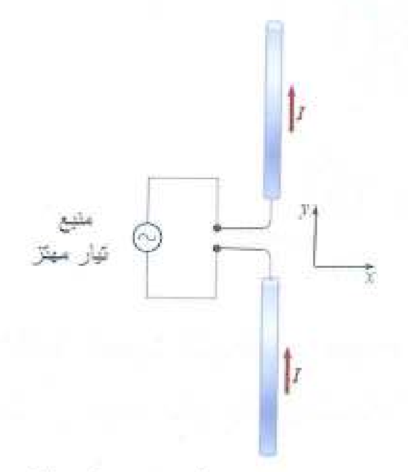
قانون غاوس في المغنطيسية. ينص قانون غاوس في المغنطيسية Gauss's law for magnetism على عدم وجود أحاديات قطب مغنطيسية (المغنطيس له على الأقل قطبان شمالي وجنوبي)، وعلى أن خطوط الحقل المغنطيسي هي دائماً حلقات مغلقة.

قانون فارادي. ينص قانون فارادي Faraday's law على أن تغير الحقل المغنطيسي يولد أيضاً حقلاً كهربائياً.

قانون أمبير ماكسويل. ينص قانون أمبير ماكسويل Ampere's Maxwellعلى أن التيار الكهربائي أو تغير الحقل الكهربائي يولد حقلاً مغنطيسياً. عندما تجمع معادلات ماكسويل، يكون حلها جيبياً لحقلين كهربائي ومغنطيسي متغيرين بدلالة المكان والزمان يشكلان الأمواج الكهرطيسية EM waves. يجدر بالذكر أنه لا يمكن أن توجد موجة للحقل الكهربائي على حدة أو موجة للحقل المغنطيسي على حدة.

3.5.2. الهوائي

يؤدي الحقل الكهربائي الموازي لهوائي (ذي القطبين الكهربائي) إلى اهتزاز الإلكترونات في الهوائي وتوليد تيار متناوب AC current فيه (الشكل3.34a). يجب على الهوائي (ذي قطبين كهربائي) المستقبل أن يوجه وفق الحقل الكهربائي للموجة ليكون الاستقبال أعظمياً.



الشكل 3.34a. تيار في هوائي ذي قطبين كهربائي

ولما كان للموجة الكهرطيسية مركبة مغنطيسية، فيمكن توجيه الهوائي ذي القطبين المغنطيسي بحيث يمر الحقل B-field في مستوي حلقة ويخرج منها، محرضاً فيها تياراً (الشكل3.34b). ويكون الحقل المغنطيسي لموجة كهرطيسية عمودياً على حقلها الكهربائي، وعلى اتجاه انتشارها.



الشكل3.34b. تيار متحرض في هوائي ذي قطبين مغنطيسي

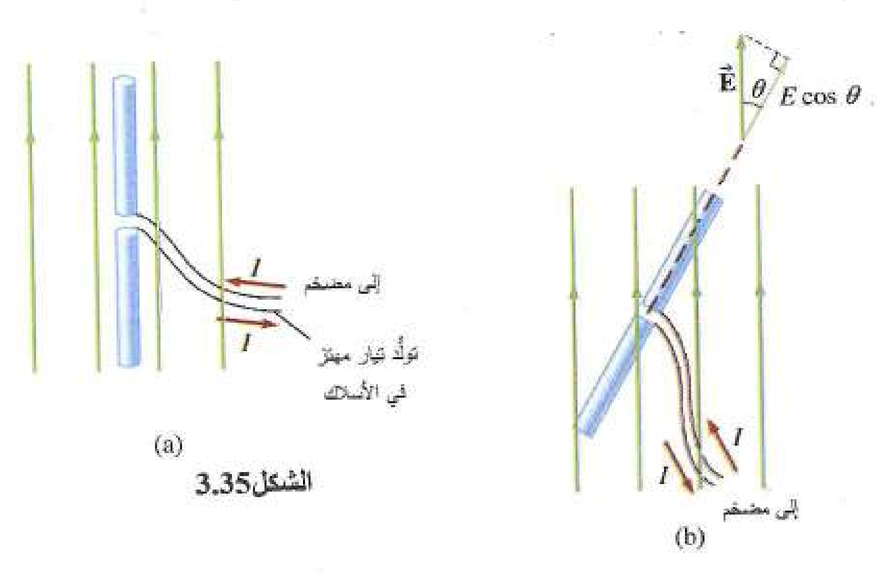
ثنائي قطب مغنطيسي

سلك على شكل حلقة يؤدي دور هوائي ذي قطبين مغنطيسي. عندما يتغير الحقل المغنطيسي للموجة الكهرطيسية، يتغير التدفق المغنطيسي في الحلقة، مؤدياً إلى تيار متحرض في الحلقة (حذفت خطوط الحقل الكهربائي للإيضاح).

نقطة اختبار checkpoint

ماذا يحدث لو تم توجيه هوائي ذي قطبين كهربائي (المستقبل) عمودياً على الحقل الكهربائي E للموجة؟

(a) إن الحقل الكهربائي E لموجة كهرطيسية يجعل تياراً مهتزاً يسري في هوائي ذي قطبين كهربائي. (تم حذف خطوط الحقل المغنطيسي للإيضاح). **(b)** يكون التيار في الهوائي أصغر عندما لا يكون موجهاً وفق الحقل الكهربائي. ولا يسرع الإلكترونات وفق محور الهوائي إلا مركبة الحقل التي توازيه(الشكل3.35).



الشكل3.35

3.5.3. الطيف الكهرطيسي The EM Spectrum

يمكن أن توجد الأمواج الكهرطيسية بأي تواتر (الشكل3.32).

3.5.4. سرعة الضوء

كان ماكسويل قادراً على استنتاج سرعة الأمواج الكهرطيسية في الخلاء من معادلاته. إذ إن الأمواج الكهرطيسية لا تحتاج إلى وسط مادي لتنتشر فيه.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

حيث ε_0 سماحية الفضاء الخالي الكهربائية، μ_0 نفوذية الفضاء الخالي المغنطيسية.

$$c = \frac{1}{\sqrt{(8.85\times10^{-12} C^2 / Nm^2)(4\pi\times10^{-7} Tm / A)}}$$

$$= 3.00\times10^{8} m / s$$

عندما ينتشر الضوء في وسط مادي تنخفض سرعته وفق العلاقة:

$$v = \frac{c}{n}$$

حيث v سرعة انتشار الضوء في الوسط، و n قرينة انكسار الوسط. وعندما تنتقل موجة من وسط إلى آخر يظل التواتر نفسه، ولكن الطول الموجي يتغير. الوسط المبدد هو الوسط الذي تعتمد فيه قرينة الانكسار على طول موجة الضوء.

مثال3.9. لدراسة بنية جسم بلوري، تتطلب إنارته بإشعاع كهرطيسي طوله الموجي يساوي البعد بين الذرات في البلورة أي 0.20nm. **(a)** ما تواتر هذا الإشعاع الكهرطيسي؟

$$f=\frac{c}{\lambda}=\frac{3.0\times10^{8}\,m/s}{0.20\times10^{-9}\,m}=1.5\times10^{18}\,Hz$$

(b) في أي جزء من طيف الإشعاعات الكهرطيسية يقع؟ (الأشعة السينية)

3.5.5. خصائص الإشعاعات الكهرطيسية

تنتشر جميع الإشعاعات الكهرطيسية في الخلاء بسرعة الضوء c. وللحقلين الكهربائي والمغنطيسي تواتر الاهتزاز نفسه f. يرتبط الحقلان الكهربائي والمغنطيسي فيما بينهما على النحو:

$$E(x,y,z,t)=cB(x,y,z,t)$$

أي يوجد تناسب طردي بين الحقلين الكهربائي والمغنطيسي. والأمواج الكهرطيسية عرضانية. يهتز الحقلان الكهربائي والمغنطيسي في اتجاه يتعامد مع اتجاه انتشار الموجة. كما أن الحقلين الكهربائي والمغنطيسي يتعامد أحدهما مع الآخر.

يعطى اتجاه انتشار الأمواج الكهرطيسية بالجداء المتجه $\mathbf{E}\times\mathbf{B}$. تحمل الموجة الكهرطيسية وسطياً نصف طاقتها بحقلها الكهربائي وتحمل النصف الآخر بحقلها المغنطيسي.

يمكن التعبير عن الحقل الكهربائي بالعلاقة $E_z(y,t)=E_m\sin(ky-\omega t+\phi)$، حيث E_m سعة الحقل الكهربائي، k العدد الموجي ويساوي $k=2\pi/\lambda$، ω التواتر الزاوي ويساوي $\omega=2\pi f$، و ϕ ثابت الطور. وسرعة انتشار الموجة $c=\lambda f=\omega/k$.

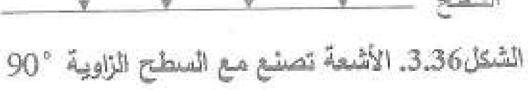
مثال3.10. يعطى الحقل الكهربائي لموجة كهرطيسية بالعلاقة:

$$E_z(y,t)=E_m\sin(ky-\omega t+\frac{\pi}{6})\text{، و } E_x=0 \text{ و } E_y=0$$

في أي اتجاه تنتشر هذه الموجة؟

لا تعتمد الموجة على الإحداثيين x أو z؛ فلا بد أن تنتشر على التوازي مع المحور y. تنتشر الموجة في الاتجاه $+y$.

3.5.6. انتقال الطاقة بالأمواج الكهرطيسية



الشكل3.36. الأشعة تصنع مع السطح الزاوية °90

تعطى شدة الموجة بالعلاقة $I=\frac{P_{av}}{A}$، وهي مقياس لكمية الطاقة الساقطة على واحدة السطوح في الثانية في حالة الورود الناظمي، حيث A مساحة السطح.

كما تعطى شدة الموجة بالعلاقة:

$$I=\frac{\Delta E}{A\Delta t}=\frac{u_{av}V}{A\Delta t}=\frac{u_{av}A\Delta x}{A\Delta t}=u_{av}c$$

حيث u_{av} الكثافة المتوسطة (الطاقة في وحدة الحجم) لطاقة الموجة. وفي حالة الأمواج الكهرطيسية

$$u_{av}=\varepsilon_0 E_{rms}^2=\frac{1}{\mu_0}B_{rms}^2$$

مثال3.11. تبلغ شدة ضوء الشمس التي تصل الغلاف الجوي العلوي 1400W/m^2. **(a)** ما هو خرج الاستطاعة المتوسطة الكلية للشمس، بفرض أنها منبع متماثل المناحي؟ علماً أن بعد الشمس عن الأرض $R=1.50\times10^{11}$.

$$P_{av}=IA=I\left(4\pi R^2\right)$$

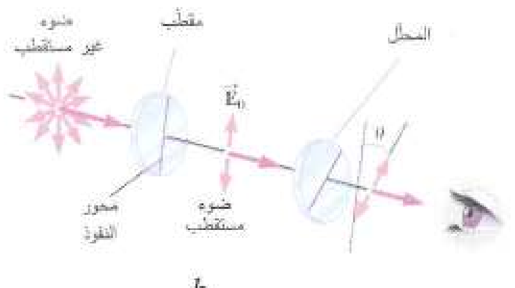
$$P_{av}=4\pi(1400W/m^2)\left(1.50\times10^{11}\right)^2=4.0\times10^{26}W$$

(b) ما شدة ضوء الشمس الوارد على عطارد، الذي يبعد $5.8\times10^{10}m$ عن الشمس؟

$$I=\frac{P_{av}}{A}=\frac{P_{av}}{4\pi r^2}=\frac{4.0\times10^{26}W}{4\pi(5.8\times10^{10})^2}=9460W/m^2$$

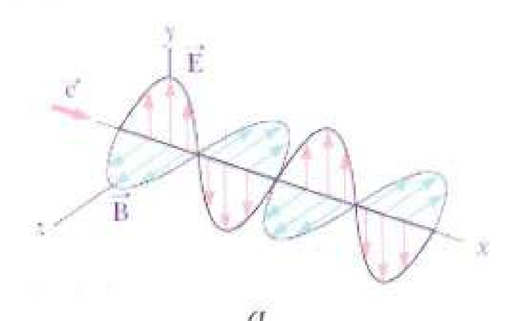
3.5.7. الاستقطاب

طالما أن الحقل الكهربائي عمودي دائماً على الحقل المغنطيسي في الموجة الكهرطيسية فيكتفى عادة بالحديث عن الحقل الكهربائي فقط للموجة. ويمكن أن يكون الاستقطاب خطياً، بمعنى أن الحقل الكهربائي يبقى في مستو واحد في أثناء الانتشار (الشكل3.37b)، أو متغير الاتجاه في المستوي العمودي على الانتشار (الشكل3.37a) أو أن يكون الاستقطاب جزئياً محصوراً ضمن مستويين أثراهما خطان في المستوي



b

استقطاب خطي للضوء بمقطب.

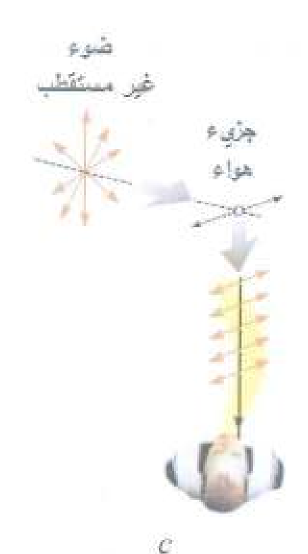


a

موجة غير مستقطبة.

العمودي على جهة الانتشار (الشكل3.37c). ويوجد أدوات لجعل الضوء مستقطباً تدعى مقطبات فهي لا تمرر إلا الضوء الذي يتوافق استقطابه مع الاتجاه المسموح فيها.

يعطى اتجاه استقطاب موجة كهرطيسية باتجاه الحقل الكهربائي. تكون الأمواج الكهرطيسية التي يصدرها هوائي مستقطبة؛ ويكون للحقل الكهربائي دائماً الاتجاه نفسه عند انتشار الموجة، فنقول إن الموجة مستقطبة استقطاباً خطياً. ويكون منبع للأمواج الكهرطيسية غير مستقطب إذا كان لحقوله الكهربائية اتجاهات عشوائية عند انتشاره.



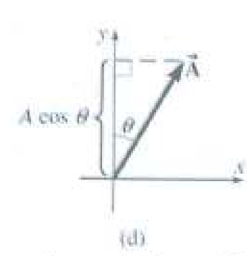
استقطاب الضوء بجزيء هواء

الشكل3.37. الاستقطاب

يمرر المقطب polarizer الأمواج المستقطبة خطياً في الجهة نفسها بشكل مستقل عن الموجة الواردة.

عندما يرد ضوء غير مستقطب على مقطب1(الشكل3.38)، تكون شدة الضوء المارة منه $I = I_0 / 2$.

وإذا كانت الموجة الواردة مستقطبة في الأصل، تكون الشدة المارة $I = I_0 \cos^2 \theta$، حيث θ الزاوية بين اتجاه استقطاب زاوية الورود ومحور تمرير المقطب. (قانون مالوسLaw of Malus).



لا تمر إلّا مركبة سعة الموجة الموازية لمحور التمرير

الشكل3.37d

مثال3.12. ضوء غير مستقطب يمر خلال مقطبين على التوالي يصنع محورا استقطابهما الزاوية 45° أحدهما مع الآخر(الشكل3.39). ما نسبة شدة الضوء الوارد التي تمر من المقطبين؟

عندما يمر الضوء من المقطب الأول تتغير الشدة من I_0 إلى I_1، ثم يمر الضوء من خلا ل المقطب الثاني وتصبح الشدة I_2. بعد المرور في المقطب الأول، تصبح الشدة نصف قيمتها الابتدائية. تكون الموجة في هذه الحالة مستقطبة خطياً.



الشكل3.38

45°

الشكل3.39

$$I_1 = \frac{1}{2} I_0$$

$$I_2 = I_1 \cos^2 \theta = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 45^{\circ} = \frac{1}{4} I_0$$

3.5.8. مفعول دوبلر الكهرطيسي

هو تغير تواتر يدركه راصد مقارنة بتواتر راصد ساكن بالنسبة للمنبع، أي ينزاح التواتر، و يعبر عن انزياح دوبلر في الأمواج الكهرطيسية على النحو:

$$f_o = f_s\sqrt{\left(1+\frac{v}{c}\right)\Big/\left(1-\frac{v}{c}\right)}$$

حيث f_s التواتر الذي يصدره المنبع، f_o التواتر الذي يدركه المراقب، v السرعة النسبية للمنبع والمراقب، و c سرعة الضوء. فإذا كان المراقب والمنبع يقتربان أحدهما من الآخر، تكون v موجبة؛ وفي الحالة التي يبتعدان فيها أحدهما من الآخر تكون v سالبة.

وعندما يكون $v/c << 1$، يمكن تقريب العلاقة السابقة لتصبح على الشكل:

$$f_o \approx f_s\left(1+\frac{v}{c}\right)$$

ويلاحظ شبه هذه العلاقة بعلاقة انزياح دوبلر للأمواج الصوتية.

من أهم تطبيقات مفعول دوبلر الكهرطيسي التنبؤ عن حالة الطقس باستخدام الرادار الذي يعتمد على الأمواج الراديوية Radio Detecting And Ranging (RADAR). حيث يعطي الفاصل الزمني بين إصدار نبضات الرادار واستقبالها بعد انعكاسها عن قطرات المطر raindrops موقع الهطل precipitation. وقياس انزياح تواتر دوبلر (كما في المثال 18.1) يخبرنا عن سرعة حركة الغيمة وفي أي اتجاه.

ثمة تطبيق مهم آخر في الفلك، إذ يمكن تحديد سرعة المجرات البعيدة بانزياح دوبلر. حيث ينزاح الضوء من المجرات البعيدة، نحو التواترات الأخفض مشيراً إلى ابتعاد المجرات عنا. تدعى هذه الظاهرة انزياح الأحمر redshift لأن تواتر الأحمر هو الأخفض وتنزاح باتجاهه في المجال المرئي. وبقدر ما يكون انزياح التواتر أكبر تكون سرعة ابتعاد المجرات عنا أكبر. وتعد هذه الظاهرة أساساً لفكرة تمدد الكون، وهي إحدى أسس فكرة أن الكون بدأ بانفجار أعظم Big Bang.

مثال3.13. يصدر أحد النجوم ضوءاً طوله الموجي 659.6nm. وعندما قيس هذا الطول الموجي على الأرض وجد أنه يساوي 661.1nm. فما سرعة حركة النجم بالنسبة إلى الأرض؟ وهل يقترب من الأرض أم يبتعد عنها؟

إن انزياح الطول الموجي صغير جداً $\Delta\lambda << \lambda$ ومن ثمّ فإن $v << c$.

$$f_o \approx f_s\left(1+\frac{v}{c}\right)$$

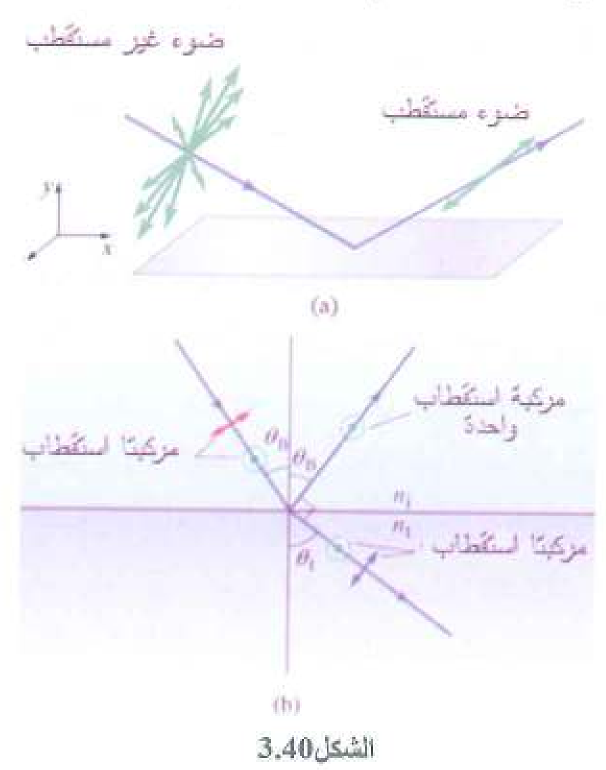
$$\frac{v}{c}=\frac{f_o}{f_s}-1=\frac{c/\lambda_o}{c/\lambda_s}-1=\frac{\lambda_s}{\lambda_o}-1=-0.0023$$
$$v=-6.8\times10^5\,m/s=-680\,km/s$$

النجم يبتعد عن الأرض.

3.5.9. الاستقطاب بالانعكاس

تعرف زاوية بروستر Brewster's angle بأنها زاوية الورود التي يكون الضوء المنعكس عندها مستقطباً كلياً (الشكل3.40a). ويعزى ظهور الاستقطاب إلى وجوب تحقق استمرارية مركبة الحقل عند السطح العاكس. يستقطب الضوء كلياً عندما يكون الشعاع المنعكس والشعاع النافذ متعامدين (الشكل3.40b).

$$n_i\sin\theta_i=n_t\sin\theta_t$$
$$n_i\sin\theta_B=n_t\sin(90^\circ-\theta_B)=n_t\cos\theta_B$$
$$\tan\theta_B=\frac{n_t}{n_i}$$



الشكل3.40

مثال3.14. (a) يكون ضوء الشمس المنعكس عن سطح بحيرة ساكن مستقطباً كلياً عند أي زاوية يرد بالنسبة للأفق؟

$$\tan\theta_B=\frac{n_{water}}{n_{air}}=\frac{1.33}{1.00}=1.33$$

(قياس الزاوية من الناظم) $\theta_B=53.1^\circ$

وقياس الزاوية من الأفق $90^\circ-53.1^\circ=36.9^\circ$.

(b) في أي اتجاه يكون استقطاب الضوء المنعكس؟

يستقطب عمودياً على مستوي الورود.

(c) هل ينفذ أي من الضوء الوارد عند هذه الزاوية في الماء؟ وفي هذه الحالة ما الزاوية تحت الأفق التي ينتشر الضوء النافذ وفقها؟

من قانون سنل

$$n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2$$
$$(1.00)\sin53.1^\circ=(1.33)\sin\theta_2$$
$$\sin\theta_2=0.6000$$
$$\theta_2=36.9^\circ$$

تقاس الزاوية من الناظم، ومن ثمّ $90^\circ-36.9^\circ=53.1^\circ$ الزاوية من الأفق.

3.5.10. طاقة الأمواج الكهرطيسية

تحمل الأمواج الكهرطيسية الطاقة من منطقة إلى أخرى. ترتبط هذه الطاقة بحقلين كهربائي ومغنطيسي متغيرين. إذ يمكن التعبير عن كثافة الطاقة المختزنة في الحقل الكهربائي بالعلاقة:

$$u_E = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2$$

حيث E قيمة الحقل الكهربائي و ε_0 سماحية الهواء للحقل الكهربائي. كما يمكن التعبير عن كثافة الطاقة المختزنة في الحقل المغنطيسي بالعلاقة:

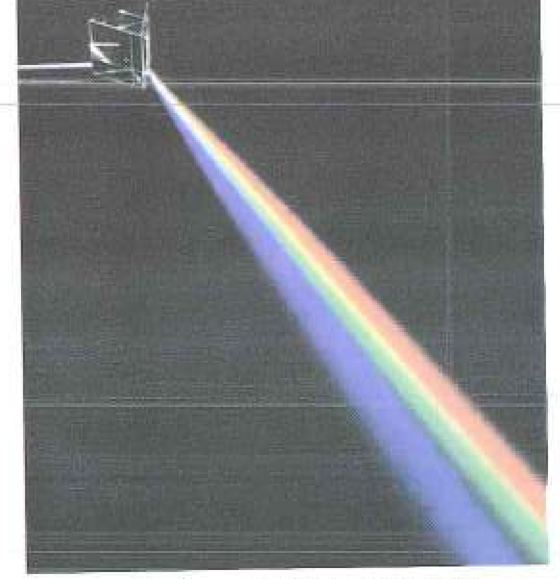
$$u_B = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$$

حيث B قيمة الحقل المغنطيسي، و μ_0 نفوذية الهواء للحقل المغنطيسي. فتكون الطاقة الكلية المختزنة في وحدة الحجوم من الفضاء

$$u = u_E + u_B = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}$$

3.5.11. الطيف المرئي وتحليل الضوء

يحلل Disperse الموشور الضوء الأبيض إلى قوس قزح من الألوان، كما هو مبين في الشكل3.41. يحدث هذا الأمر، لأن قرينة انكسار مادة معينة تعتمد على الطول الموجي. والضوء الأبيض مزيج من الأطوال الموجية المرئية، لذلك عندما يرد على موشور تنحرف اتجاهات انتشار الأطوال الموجية المختلفة بدرجات مختلفة.



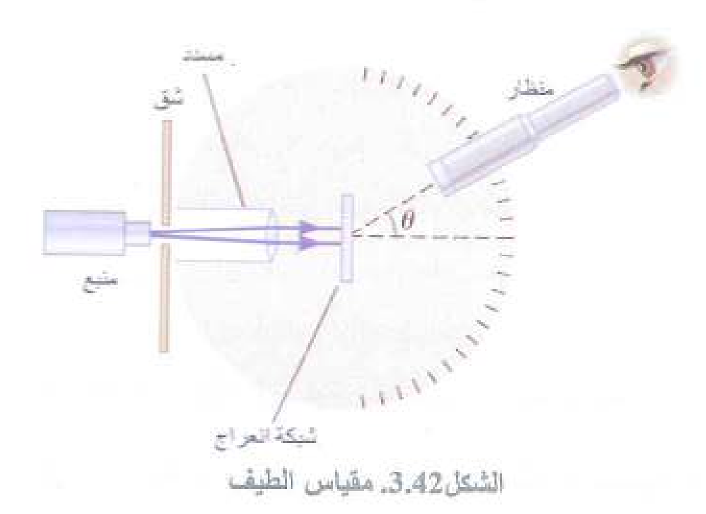
الشكل3.41. تحليل الضوء بالموشور

ولأن قرينة انكسار الأطوال الموجية الأقصر تكون أكبر، يكون انحناء الضوء البنفسجي أكبر ما يمكن عنده، في حين يكون انحناء الضوء الأحمر أقل ما يمكن. إن هذا التحلل للضوء الأبيض إلى كامل الطيف يدعى التشتت Dispersion.

مقياس الطيف والمطيافية

إن مقياس الطيف spectrometer أو منظار الطيف spectroscope (الشكل3.42) أداة لقياس الأطوال الموجية بدقة باستخدام شبكة انعراج diffraction grating أو موشور prism لفصل الأطوال الموجية المختلفة للضوء. إذ يمر الضوء من المنبع خلال شق ضيق S في المسدد. يقع الشق عند البعد البؤري

لعدسة L، ومِن ثَمَّ يسقط الضوء المتوازي على الشبكة. يمكن للمنظار المتحرك أن يجعل الأشعة تتجمع في البؤرة.



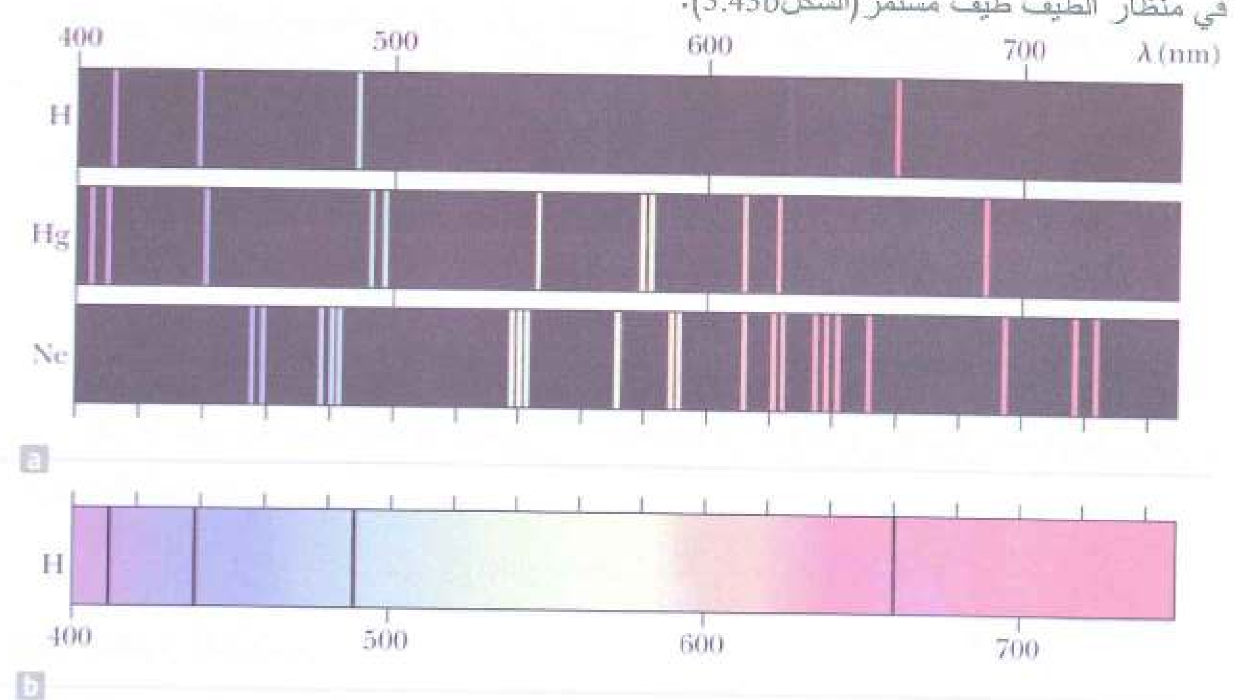
الشكل3.42. مقياس الطيف

لا يمكن رؤية أي شيء في منظار المشاهدة ما لم يقع عند الزاوية θ التي تقابل نهاية انعراج (تستخدم عادة المرتبة الأولى) لطول موجي يصدره المنبع. يمكن قياس الزاوية θ بدقة عالية جداً، ومِن ثَمَّ يمكن تحديد الطول الموجي لخط بدقة عالية باستخدام المعادلة:

$$\lambda = \frac{d}{m} \sin\theta$$

حيث m عدد صحيح يمثل الرتبة، و d البعد بين خطين من خطوط الشبكة. الخط الموازي للشق الذي تراه في مقياس الطيف يقابل أحد الأطوال الموجية عملياً.

ثمة استخدام مهم لمقياس الطيف يكمن في التعرف على الذرات والجزيئات. عندما يسخن غاز ما، يصدر الغاز طيفاً خطياً مميزاً(الشكل3.43a). أما إذا كان الضوء يضم مجالاً مستمراً من الأطوال الموجية، يرى في منظار الطيف طيفٌ مستمرٌ(الشكل3.43b).



الشكل3.43. الأطياف الخطية للغازات المشار إليها، وطيف الشمس الذي تظهر فيه خطوط الامتصاص.

طيف الامتصاص

لقد وجد أن الذرات أو الجزيئات تمتص، إذا ما تعرّضت لطيف مستمر، الخطوط الطيفية التي تصدرها تماماً. يعتمد ذلك، عملياً، على درجة حرارة المنبع وعلى درجة حرارة الغاز الماص. تفيد مطيافية الامتصاص Absorption Spectroscopy، تبعاً لذلك، في الكشف عن وجود أنواع معينة من الجزيئات في العينات المختبرية حيث يكون التحليل الكيميائي صعباً. فالجزيء الحيوي الـ DNA مثلاً وأنواع البروتين المختلفة تمتص الضوء في مناطق معينة من الطيف (كالمجال فوق البنفسجي). لا يمكن لمقدار الامتصاص أن يكشف عن نوع معين من الجزيئات فحسب، بل عن تركيزه أيضاً ويستعمل عندئذ مقياس الشدة الضوئية spectrophotometer. يحدث إصدار الضوء وامتصاصه كما أشرنا خارج المجال المرئي من الطيف، كالمجالين فوق البنفسجي وتحت الأحمر.

3.6. النظرية الفوتونية للضوء والمفعول الكهرضوئي

يترتب على الضوء (وفقاً لنظرية بلانك) كما ذكرنا في مقدمة الفصل أن يصدر على شكل لقم أو كمات، طاقة كل منها $E = hf$، حيث f تواتر الضوء الصادر (راجع المقدمة).

المفعول الكهرضوئي

عندما يسقط الضوء على سطح معدن، يلاحظ إصدار الإلكترونات من سطحه. يدعى هذا المفعول الكهرضوئي "photoelectric effect". ولهذا المفعول أثر كبير في اعتماد المثنوية الموجية الجسيمية للضوء وللأمواج الكهرطيسية عموماً.

مثال3.15. احسب طاقة فوتون ضوئي أزرق طوله الموجي في الهواء أو الخلاء $\lambda = 450nm$.

الحل. لما كان $f = c/\lambda$، لدينا:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.63\times10^{-34})\times(3\times10^{8})}{450\times10^{-9}} = 4.4\times10^{-19}\,J$$

أو

$$4.4\times10^{-19}\,J/(1.6\times10^{-19}\,J/eV = 2.8eV$$

من السهل أن نبين أنه بمجرد تحويل الوحدات أن طاقة الفوتون بالإلكترون فولت، عندما يعطى الطول الموجي بالنانومتر هي

$$E(eV) = \frac{1240}{\lambda(nm)}\ \text{(photon energy in eV)}$$

تطبيق المفعول الكهرضوئي

يعتمد الكثير من كواشف الدخان على المفعول الكهرضوئي في الكشف عن المقادير الصغيرة من الدخان التي تقطع تدفق الضوء وتغير التيار الكهربائي. كما تستخدم الخلايا الضوئية في مقاييس الطيف الامتصاصية لقياس شدة الضوء.

الفصل الرابع

الأشعة فوق البنفسجية

Ultraviolet Radiation

4.1. اكتشاف الأشعة فوق البنفسجية

اكتشفت الأشعة فوق البنفسجية نتيجة ملاحظة آثارها في التفاعلات الكيميائية وفي الكائنات الحية، وسمّيت أحياناً وفق هذه الآثار إلى أن استقر التصنيف الحالي لها.

فقد اكتشف الفيزيائي الألماني جوهان ريتر Johann Wilhelm Ritter الأشعة فوق البنفسجية الـ UV بعد اللون البنفسجي من المجال المرئي عام 1801، عندما لاحظ أنها تقوم بتسريع بعض التفاعلات الكيميائية. فأطلق عليها اسم الأشعة المؤكسِدة لتأكيد تفاعليتها الكيميائية، ولتمييزها من الأشعة الحرارية التي اكتشفت العام السابق عند الطرف الآخر من المجال المرئي. حتى أطلق عليها بعضهم مصطلح الأشعة خلال القرن التاسع عشر، وكان آنذاك من يعتقد أنها نوع من الإشعاع يختلف كلياً عن الضوء. واكتشف عام 1878 أثرها في تعقيم البكتيريا. وفي عام 1893 اكتشف الفيزيائي الألماني فكتور شومان Victor Schumann الإشعاع فوق البنفسجي تحت 200nm عندما حاول دراسة الطرف القصير الموجة من هذه الأشعة، فوجد أن الهواء شديد الامتصاص له مما اضطره للعمل تحت الخلاء، فأطلق على هذا المجال اسم الأشعة فوق البنفسجية الخلائية. وقد عرف عام 1903 أن الأطوال الموجية الأكثر فعالية حيوياً كانت حول 250nm. في عام 1960 ترسخ أثر الإشعاع فوق البنفسجي في الـDNA.

تم التخلي في نهاية المطاف عن جميع التسميات الأخرى لصالح الأشعة فوق البنفسجية، لكنها قسمت إلى مجالات توافق الآثار المختلفة. يبين الجدول4.1 والشكل 4.1 في الفقرة التالية التقسيم المعتمد عالمياً الآن إلى جانب بعض الآثار المميزة لكل مجال.

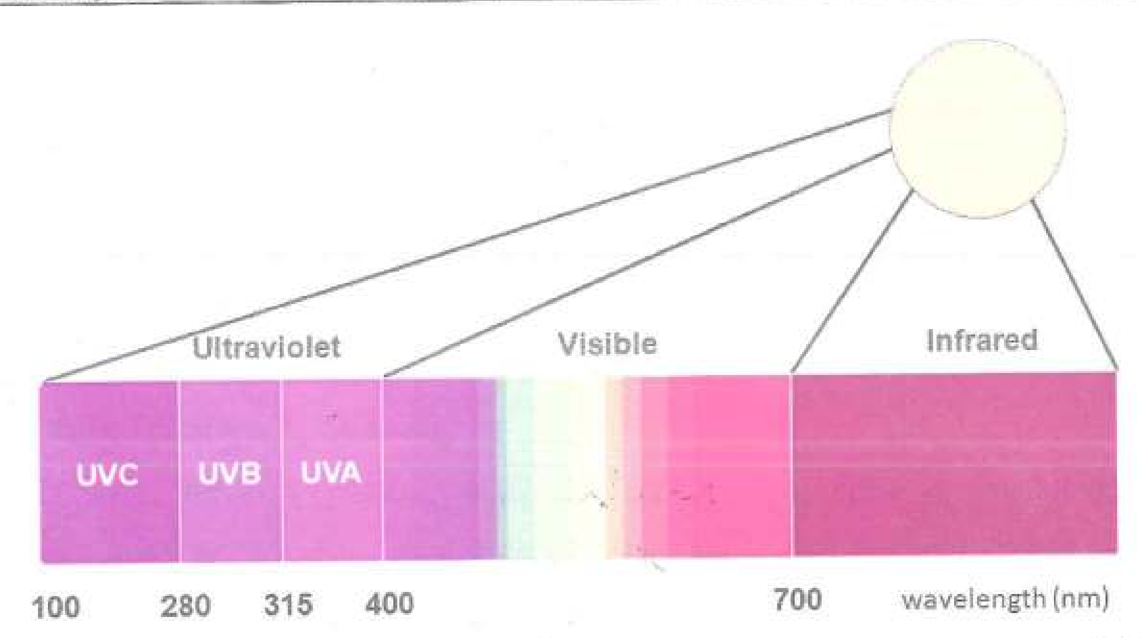
4.2. أنواع الإشعاع فوق البنفسجي

يمكن تجزئة طيف الإشعاع فوق البنفسجي المحدد عالمياً بالأطوال الموجية الواقعة بين 10-400nm إلى عدد من المجالات التي أوصت بها المنظمة الدولية للمعايرة ISO standard ISO-21348. قد يلاحظ بعض الاختلافات في تقسيم المجالات بين الكتب المختلفة.

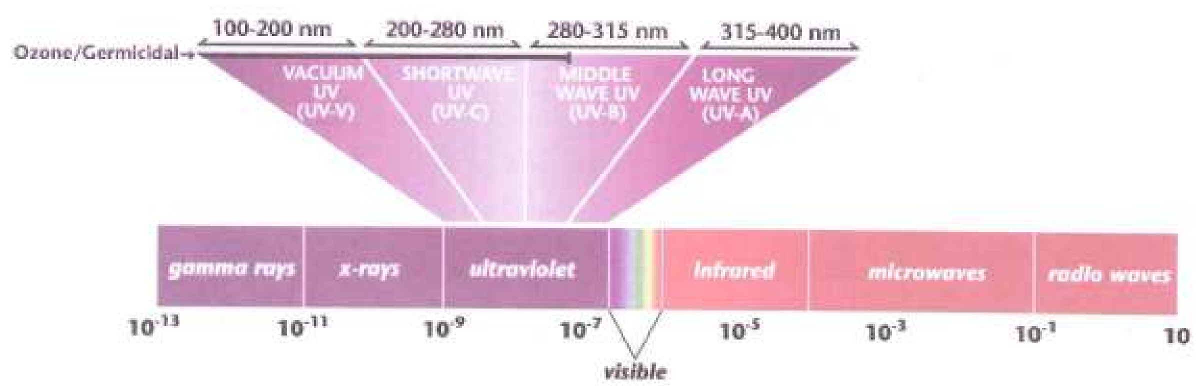
ويلاحظ تسميته أحياناً بالضوء الأسود؛ لأنه لا يرى بالعين مباشرة، وأحياناً بما يقوم به من تفاعلات في طبقات الجو المختلفة؛ لأن ما تصدره الشمس من الضوء فوق البنفسجي يقارب 10% من استطاعتها. ولأن التأثيرات الحيوية في الكائنات الحية ذات أهمية كبيرة، علينا التحري عما يصلنا من هذه الأشعة ومن ثَمّ كان لا بد من دراسة ما يحدث للأشعة فوق البنفسجية وما تحدثه حتى وصولها إلى أماكن الحياة. فقد درست تأثراتها مع طبقات الجو العليا الحاوية على الأوزون وعناصر الغلاف الجوي الأخرى دراسة مستفيضة حتى أفرد لها تسمية بحوث الكيمياء الجوية والضوئية واعتمدت لذلك.

الجدول 4.1

الاسم	الاختصار	مجال الطول الموجيnm	طاقة الفوتونeV	ملاحظات/ أسماء بديلة
المجالA	UVA	315-400nm	3.10-3.94	الضوء الأسود الطويل الموجة لاتمتصه طبقة الأوزون
المجالB	UVB	280-315	3.94-4.43	متوسط الطول الموجي الذي تمتص طبقة الأوزون معظمه
المجالC	UVC	100-280	4.43-12.4	قصير الطول الموجي، قاتل للجراثيم تمتصه طبقة الأوزون والغلاف الجوي بشكل كامل
القريب	NUV	300-400	3.10-4.13	أشعة مرئية للعصافير والحشرات والأسماك
المتوسط	MUV	200-280	4.13-6.20	
البعيد	FUV	100-200	6.20-10.16	
	H Lyman-α	121 – 122	10.16-10.25	الخط الطيفيeV 121.6 nm, 10.20. إشعاع مؤين عند الأطوال الموجية القصيرة
الخلائي	VUV	100-200	6.20-12.4	يمتصه الأكسجين الجوي بشدة في المجال 150– 200 nm ويمكن أن ينتشر في الآزوت
الأقصى	EUV	10-100	12.4-124	إشعاع مؤين تماماً ؛ يمتصه الغلاف الجوي بشكل كامل

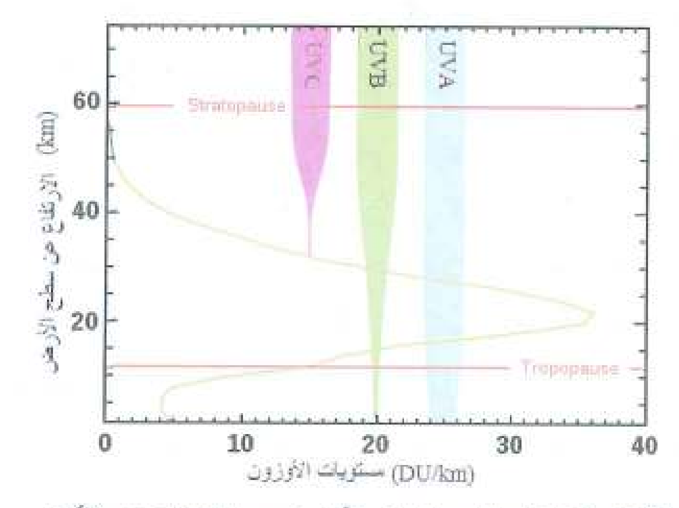


الشكل4.1a. الإشعاع الشمسي يتكون من الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء والأشعة فوق البنفسجية. تظهر في الشكل المجالات وفقاً لتزايد تواتراتها وطاقاتها UVA وUVB وUVC.



الشكل 4.1b. موقع الأشعة فوق البنفسجية من الطيف الكهرطيسي وتقسيماته حسب آثاره. ويظهر على الشكل مجال الأشعة فوق البنفسجية الخلائية UVV ذات التواترات والطاقات الأعلى في الأشعة فوق البنفسجية

يظهر الشكل 4.2 مدى امتصاص المجالات المختلفة عند تأثرها مع الغلاف الجوي بين الطبقة الساكنة stratopause وطبقة التروبوبوز tropopause وتغيرات تركيز الأوزون مع الارتفاع. وقد قدرت مستويات تركيز الأوزون بواحدة خاصة تدعى الدُبسُن Dobson (DU) لكل كيلومتر. والدُبسُن واحدة تقيس تركيز الأوزون عرفت خصيصاً لذلك، وهي عدد جزيئات الأوزون اللازمة لتشكيل طبقة من الأوزون الصافي ثخانتها 0.01mm في درجة حرارة الصفر المئوي وفي ضغط جوي واحد، أو أنها تقابل ارتفاع عمود من الهواء مساحة مقطعه واحد سنتمتر مربع يحتوي على 2.69×10^{16} جزيء أوزون؛ وهي أبرز واحداته الشائعة. على الرغم من ضآلة تركيز الأوزون



الشكل 4.2. تغيرات مستويات الأوزون مع الارتفاع عن الأرض ومدى اختراق مجالات الإشعاع فوق البنفسجي المختلفة للغلاف الجوي.

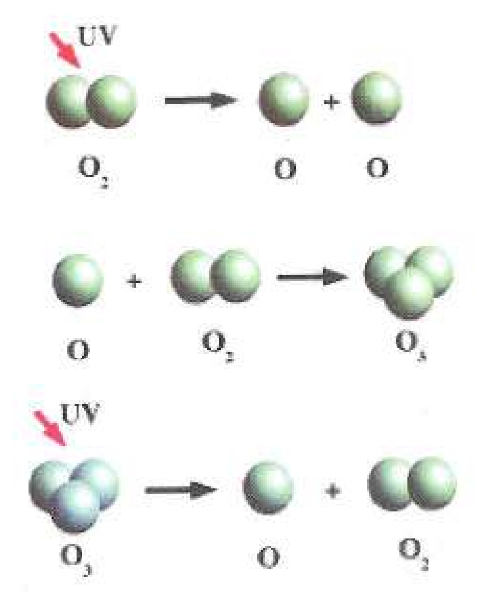


الشكل 4.3. تمثيل ثقب الأوزون

المطلق في الغلاف الجوي، حيث لا يزيد على ثلاثة جزيئات من الأوزون لكل عشرة ملايين جزيء من الهواء، فإن تأثيراته الوسيطية التي لا تستهلكه تجعل وجوده مهماً جداً، يشير الشكل 4.3 إلى ما يوصف بثقب الأوزون معبراً عنه بانخفاض تركيزه وبالدُبسُن.

تقدّر الكمية الوسطية للأوزون في الغلاف الجوي بنحو 300 Dobson Units، وهي تكافئ طبقة ثخانتها 3mm – ارتفاع قطعتي بنس 2 pennies إحداهما فوق الأخرى. وما يطلق عليه العلماء ثقب الأوزون

القطبي هو منطقة يهبط فيها تركيز الأوزون إلى نحو 100DU وسطياً. تشكل مئة وحدة دُبسُن من الأوزون، لو تم ضغطها، طبقة لا تزيد ثخانتها على 1mm، أي ارتفاع قطعة عشرة سنتات a dime .



الشكل4.4. تمثيل تخطيطي لتشكيل الأوزون وتفكيكه بالكيمياء الضوئية

يعزى امتصاص الأوزون للأشعة فوق البنفسجية قيامها بتشكيل الأوزون وتفكيكه وفق تفاعلات الشكل4.4، وإن تركيز الأوزون والطبقة اللازمة لامتصاص المجال المؤذي منها هو الذي تغير حديثاً نتيجة التفاعلات الكيميائية بينه وبين مركبات كيميائية تجعل تركيزه ينخفض وسطياً. يأتي على رأس هذه المركبات مركبات الكلور والفلور الكربونية CFC المستعملة في التبريد وأكاسيد الآزوت.

إن هذا الإشعاع فوق البنفسجي العالي الطاقة UVC (طوله الموجي 280nm) يضر كثيراً بصحة الإنسان. يتم امتصاص الـ UVC بشكل كامل بالأكسجين وجزيئات الأوزون. ويمتص الأوزون أيضاً الإشعاع UVB الأقل طاقة (280-325nm) وهذا أيضاً مضر إذا وصل سطح الأرض.

بينما بالكاد تؤثر طبقة الأوزون في UVA فيصل معظمه للأرض. ويشكل هذا الأخير تقريباً 25% من المجال فوق البنفسجي الكلي الذي يخترق الغلاف الجوي الأرضي.

4.3. الاستعمالات المفيدة للأشعة فوق البنفسجية

تستعمل هذه الأشعة في مجالات صحية وصناعية وتقنية عديدة بالاستفادة من تأثيراتها المختلفة منها:

4.3.1. في المجال الصحي

a) يحرض الـ UVB على تكوين فيتامين D في الجلد بمعدلات تصل إلى ألف وحدة دولية في الدقيقة 1,000 IUs per minute (راجع تعريف الوحدة الدولية في نهاية الفصل). يرتبط معظم الآثار الصحية الإيجابية للـUV بهذا الفيتامين، الذي يساعد على تنظيم استقلاب الكالسيوم (الحيوي للجملة العصبية وصحة العظام) والمناعة والتكاثر الخلوي وإفراز الأنسولين وضغط الدم.

b) يزداد مقدار الميلانين في الجلد (وهو الصباغ البني) بعد التعرض لإشعاع الـ UV بمستويات معتدلة تبعاً لنوع البشرة؛ وهذا ما تشيع معرفته بالاسمرار الشمسي. يعد الميلانين واقياً ممتازاً من الضوء، فهو يمتص الإشعاع UVA وUVB ويبدد الطاقة على شكل حراري غير مؤذ، واقياً البشرة.

c) تستخدم في تعقيم المعدات والتجهيزات الطبية

إذ تستعمل المصابيح فوق البنفسجية في تعقيم المكاتب والأدوات المستخدمة في مختبرات الحيوية والمنشآت الطبية. تصدر مصابيح بخار الزئبق المنخفض الضغط المتوافرة تجارياً نحو 86% من ضوئها عند الطول الموجي 254nm، القريب من إحدى قمم منحني فعالية إبادة الجراثيم. يؤدي الضوء UV عند هذه الأطوال الموجية المبيدة للجراثيم إلى إتلاف DNA المتعضيات المكروية، على نحوٍ لا يمكنها أن تعيد إنتاج نفسها، ويجعلها غير مؤذية (حتى لو لم تقتل المتعضية). وحيث يمكن للمتعضيات المكروية أن تهرب من الضوء فوق البنفسجي في الصدوعات الصغيرة والمناطق الأخرى المظللة، تستخدم هذه المصابيح بالإضافة إلى تقنيات التعقيم الأخرى.

d) المعالجة بالضوء فوق البنفسجي

يساعد الإشعاع فوق البنفسجي في معالجة حالات جلدية كالصداف psoriasis والبهق vitiligo. إذْ تجري معالجة الصداف بتناول الصدافولينات والتعرض لضوء الـ UVA فيصبح الجلد شديد الحساسية للضوء مع تناول الصدافولينات psoralens، وهي طريقة فعالة في معالجة الصداف. ونظراً لإمكانية إحداث الصدافولينات ضرراً في الكبد، فإنه لا يمكن استخدام المعالجة PUVA إلّا عدداً محدوداً من المرات طوال عمر الفرد لما تسببه من سرطانات جلدية أكثر من الخوف من الأذية الكبدية.

إن المعالجة الضوئية UVB phototherapy لا تتطلب مزيداً من الأدوية أو تحضيرات موضعية لصالح العلاج؛ ولكن التعرض للضوء ضروري. غير أنّه يمكن للمعالجة الضوئية أن تكون فعالة عندما تستخدم جنباً إلى جنب مع بعض المعالجات الموضعية مثل الأنثرالين وقطران الفحم ومشتقات فيتامين A و D أو معالجات نظامية مثل الميتوترِكْسات methotrexate والسورياتان soriatane.

e) تنقية الهواء

باستعمال تفاعل كيميائي تحفيزي من أكسيد التيتانيوم والتعريض للضوء UVC من شأن أكسدة المادة العضوية أن يحول المُمْرِضات pathogens وأبواغ الفطور mold spores إلى منتجات ثانوية عاطلة غير ضارة. إن آلية التنظيف بالـUV هي عملية فوتوكيميائية. وتعد الملوثات في البيئة الداخلية هي مركبات عضوية بالكامل تقريباً باعتمادها على الكربون، والتي تنخفض عندما تتعرض إلى شدة عالية للـ UV عند الأطوال الموجية من 240nm إلى 280nm. يمكن للضوء فوق البنفسجي القصير الطول الموجي أن يتلف الـDNA في العضيات المكروية الحية. ترتبط فعالية UVC بشكل مباشر بشدتها ومدة التعرض.

4.3.2. في الكشف الجرمي

a) يستخدم رجال الشرطة مسحوقاً متفلوراً يتوهج لدى امتصاصه الأشعة فوق البنفسجية في إظهار بصمات الأصابع (الشكل4.5).

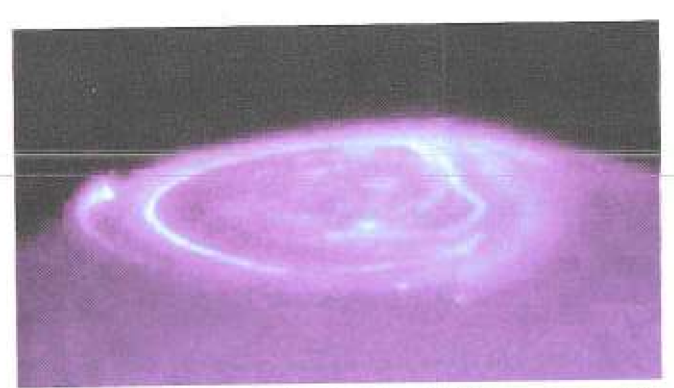


الشكل4.5. لإظهار بصمات الأصابع يستخدم رجال المباحث مسحوقاً يتفلور لدى تعرضه للأشعة فوق البنفسجية (غير المرئية بالعين المجردة).

b) التصوير الضوئي بالإشعاع فوق البنفسجي المنعكس مفيد في الدراسات الطبية والعلمية والشرعية، في تطبيقات واسعة الانتشار كالكشف عن خدش البشرة والتعديلات في الوثائق أو تصليح العمل على اللوحات الفنية. يستخدم التصوير الضوئي للفلورة المتولدة بالإضاءة فوق البنفسجية أطوالاً موجية مرئية للضوء.

4.3.3. في علم الفلك

يستخدم علم الفلك فوق البنفسجي القياسات للكشف عن التركيب الكيميائي للوسط بين النجوم، ودرجة حرارة النجوم وتركيبها. ولأن طبقة الأوزون توقف الكثير من التواترات فوق البنفسجية فتمنعها من الوصول إلى المقاريب على سطح الأرض، تجري معظم عمليات رصد الـUV من الفضاء، الشكل 4.6.



الشكل4.6. هالة القطب الشمالي للمشتري كما ترى بالضوء فوق البنفسجي بالمقراب الفضائي هبل.

4.3.4. في الصناعة الكهربائية والإلكترونية

يمكن كشف الانفراغ الهالي corona discharge على الجهاز الكهربائي بإصداراته فوق البنفسجية. تؤدي الهالة إلى تدني العزل الكهربائي وإصدار الأوزون وأكسيد النتروجين. وتستعمل لمحو بعض وحدات الذواكر EPROM (ذاكرة القراءة فقط القابلة للبرمجة القابلة للمسح) بتعرضها لإشعاع الـ UV. تتميز هذه الوحدات بنافذة من الكوارتز شفافة على سطح الرقاقة تسمح بإمرار إشعاع الـ UV إلى داخلها. وتستعمل الأشعة فوق البنفسجية أيضاً في الحفر الضوئي للدارات الإلكترونية.

4.3.5. الأصبغة المتفلورة

تضاف الأصبغة المتفلورة عديمة اللون التي تصدر الضوء الأزرق عندما تخضع لـ UV إلى الورق والأنسجة كمبيضات ضوئية optical brighteners. من شأن الضوء الأزرق الذي تصدره هذه الوسائط

أن يعاكس الآثار الصفراء التي يمكن أن توجد، وهو ما يجعل الألوان والبياضات تبدو أكثر بياضاً والألوان أكثر لمعاناً.

كما تستخدم الأصبغة المتفلورة بالـ UV التي تتوهج بالألوان الأولية في دهانات الطلاء والأوراق والأنسجة إما لتعزيز اللون في إضاءة ضوء النهار وإمّا لتزيد آثار خاصة عندما تضاء بمصابيح UV. تستخدم دهانات اللون الأسود التي تحوي أصبغة تتوهج بفعل الـ UV في عدد من التطبيقات الفنية والتجميلية.

4.3.6. في الكيمياء والجيولوجيا

يستعمل الضوء فوق البنفسجي في التحاليل الكيفية للفلزات، فتظهر بألوان زاهية مختلفة تبعاً لتركيبها لدى تعرضها للإشعاع فوق البنفسجي (الشكل4.7).

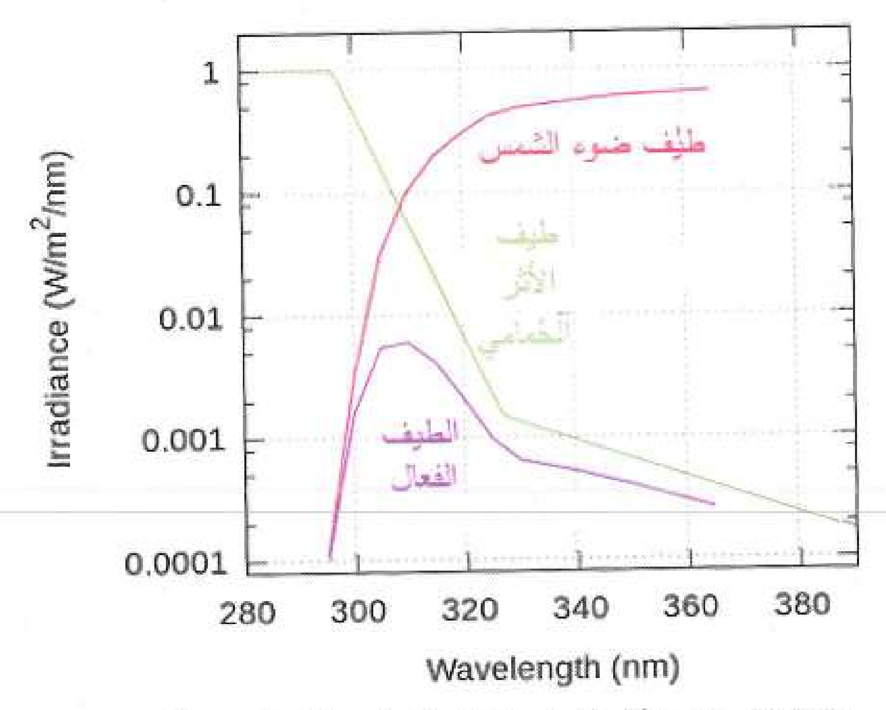


الشكل 4.7. مجموعة من الفلزات التي تتفلور فتتألق بأطوال موجية مختلفة في أثناء تعريضها للضوء فوق البنفسجي

4.4. الآثار الضارة للأشعة فوق البنفسجية

إن زيادة التعرض للأشعة فوق البنفسجية سواء عن قصد بالمعالجة أم عن غير قصد تؤذي الأحياء عامة والإنسان خاصة، غير أن الأذية تختلف باختلاف العضو المتعرض، فالجلد يتأثر بصورة مغايرة للعين مثلاً. تعود هذه الخصائص للإشعاعات الكهرطيسية العالية التواتر إلى المفعولات الكمومية التي تؤذي المواد والنسج بشكل دائم على المستوى الجزيئي، وذلك لأن فوتون الأشعة فوق البنفسجية يحمل طاقة كافية لإتلاف بعض الروابط الجزيئية، (انظر الجدول4.1). وهي كافية لتأيين بعض المركبات والجزيئات أيضاً.

يظهر في الشكل4.8 أثر الحروق الشمسية Sunburn effect (أو الطيف الفعال) (مقيساً بالنسبة لـ UV) ويساوي حاصل ضرب طيف ضوء الشمس (شدة الإشعاع) وطيف الأثر الحُمامي (الحُمامى: احمرار البشرة بسبب الإشعاع) erythemal action spectrum (حساسية البشرة) في مجال الأطوال الموجية لـ UV. يتزايد حدوث الحروق الشمسية لكل ميلي واط من الإشعاع بالعامل 100 تقريباً في مجال الأطوال الموجية المتوسط 295-315 nm لـUVB.



الشكل4.8. طيف الأثر الحُمامي والطيف الفعال بدلالة طول موجة الضوء

يدعى تغير أثر الضوء في قرنية وبشرة الإنسان باختلاف الطول الموجي أحياناً طيف الأثر الحُمامي (احمرار البشرة بسبب الإشعاع)، أي معدل النشاط الفيزيولوجي بدلالة طول موجة الضوء. يبين طيف الأثر الحمامي على أن الـ UVA لا يسبب أي تفاعل فوري، بل يبدأ بإحداث تقرنات ضيائية Actinic keratosis واحمرار في الجلد (أكثر حساسية مع القوقاسيين Caucasians) عند الأطوال الموجية التي تبدأ بالقرب من العصابة UVB عند الطول الموجي 315nm، ثم تزداد بسرعة نحو 300nm. ويعد كل من الجلد والعينين أكثر حساسية لـ UV في المجال 265–275 nm، الذي يقع في العصابة UVC الأخفض. يستمر الأذى بالحدوث عند الأطوال الموجية الأقصر لـ UV، ولكن آثارها المفتوحة ليست كبيرة في حالة الأشعة الضعيفة الاختراق للغلاف الجوي. ومعيار منظمة الصحة العالمية لمؤشر الـ UV قياسٌ تم إعلانه على نطاق واسع للقوة الكلية للأطوال الموجية التي تحدث حرقاً شمسياً في جلد الإنسان، بتثقيل التعرض للـUV من أجل مفعولات طيف الأثر في لحظة وموضع معينين. يبين هذا المعيار أن معظم الحرق الشمسي يعود لـ UV عند أطوال موجية قريبة من الفاصل بين العصابتين UVA وUVB.

4.4.1. ضرر الجلد

إن فرط التعرض للإشعاع UVB لا يسبب الحرق الشمسي فحسب، بل أيضاً يمكن أن يحدث بعض أشكال سرطان الجلد. غير أن درجة الاحمرار وإثارة العين (التي لا تنجم عن UVA) لا تتنبأ بالآثار الطويلة الأمد لل UV على الرغم من أنها تعكس مباشرة الأذى الذي أحدثته الـ UV بالـ DNA في خلايا الجلد. تصنف منظمة الصحة العالمية الإشعاع فوق البنفسجي الواسع الطيف أنه المجموعة 1 المولدة للسرطان. يمكن لأشعة الـ UV في المجال المتوسط أن تؤين، بل يمكن أن تحطّم الروابط الجزيئية، وتجعل الجزيئات شديدة الفعالية. فالحروق الشمسية مثلاً تنجم عن المفعولات التمزيقية للجزء المتوسط من مجال الـ UV لخلايا الجلد، التي تشكل السبب الرئيسي لسرطان الجلد skin cancer.

4.4.2. الأشعة فوق البنفسجية والعين

لا يمكن للأفراد أن يدركوا الأشعة فوق البنفسجية مباشرة؛ لأن عدسة عين الإنسان توقف معظم الإشعاع في مجال الأطوال الموجية 300–400 nm؛ بينما توقف القرنية الأطوال الموجية الأقصر. ومع ذلك تتحسس المستقبلات الضوئية في الشبكية بالأشعة فوق البنفسجية القريبة، ويمكن للأفراد اللاعدسيين (الذين يفتقدون للعدسة aphakia) أن يدركوا المجال فوق البنفسجي القريب على شكل أزرق ضارب إلى البياض أو بنفسجي ضارب إلى البياض.

والعين أكثر حساسية للتلف بالـ UV في العصابة ذات الأطوال الموجية الأقصر UVC (265–275 nm). إن ضوء هذا المجال غائب تقريباً من ضوء الشمس، ولكنه يوجد في ضوء قوس اللحام والمنابع الصنعية الأخرى. والتعرض إليها يمكن أن يسبب التهاب القرنية الضوئي أو التهاب القرنية عند العاملين بلحام المعادن. كما أن UVB في ضوء الشمس ضمن المجال 280 nm–310nm يسبب أيضاً التهاب القرنية الضوئي (العمى الثلجي). كما يمكن أن يتلف كلاً من القرنية والعدسة والشبكية.

4.4.3. ضرر الدنا DNA

يمكن لضوء الـ UVB أن يؤدي إلى إتلاف الـ DNA مباشرة. كما يتأذى الـ DNA أيضاً، بشكل غير مباشر، بأنواع الأكسجين التفاعلي الذي تحدثه الأشعة فوق البنفسجية UVA الأخفض بكثير من أن تضر بالـ DNA بشكل مباشر.

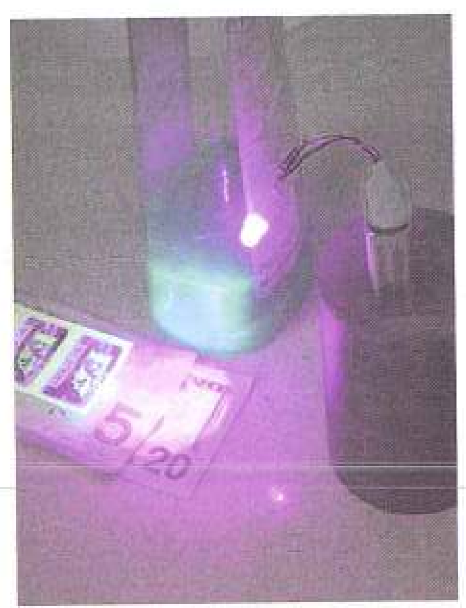
4.5. توليد الأشعة فوق البنفسجية

تطلبت التطبيقات الكثيرة المفيدة للأشعة فوق البنفسجية تصنيع معدات تصدر هذه الأشعة بشدات مناسبة وبمجال موجي مناسب لكل تطبيق على حدة.


الشكل4.7. مصباح تعقيم

مصابيح زئبقية وانفراغية مملوءة بغازات مختلفة

فقد شاعت مصابيح عالية الاستطاعة للعروض المسرحية والغنائية لإيجاد مؤثرات خاصة. ومصابيح الاسمرار ذات استطاعات متوسطة. ومصابيح لقتل الجراثيم أو تهريبها. يظهر في الشكل 4.7 مصباح يستعمل في متجر للتعقيم.


الشكل 4.8. ديود منزلي يصدر أشعة فوق بنفسجية

ليزرات خاصة

صنعت ليزرات خاصة لعمليات العين والعمليات الجراحية الأخرى قد يكون أشهرها ليزر الإكسايمر. كما صنعت ليزرات قابلة للتوليف على مجال مناسب لإزالة الوشم أو صناعته. وتستعمل ليزرات ضخمة مولدة لأشعة فوق بنفسجية في مجالات واسعة تعتمد المسرعات الإلكترونية وذلك لأغراض صناعية.

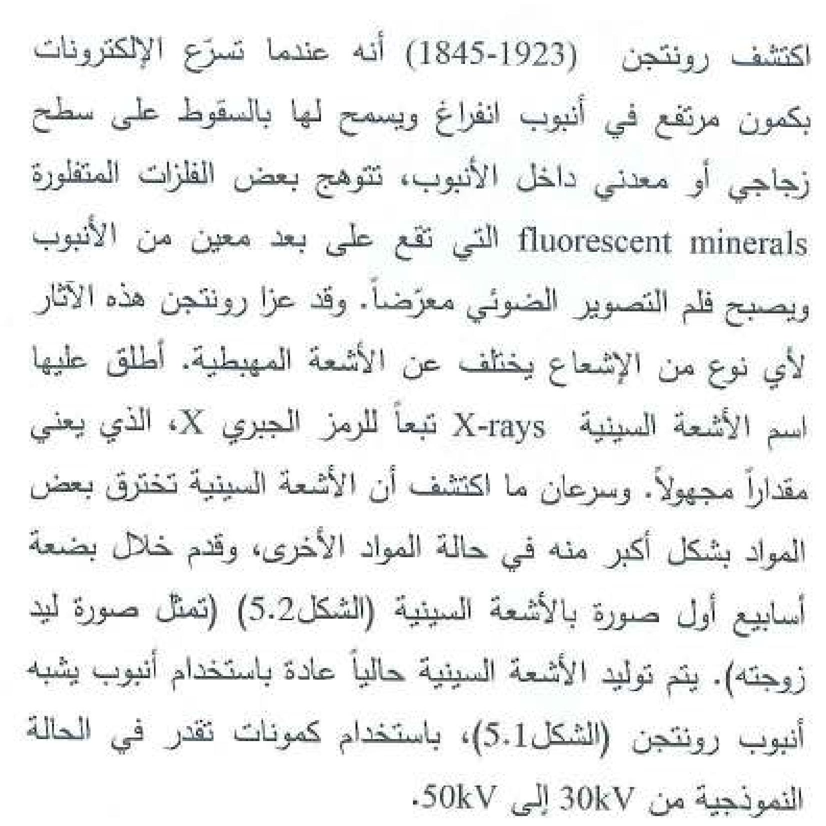
كما صنعت ديودات مشعة للضوء فوق البنفسجي منزلية لقراءة أو كشف بعض العلامات التجارية، يظهر أحدها في الشكل 4.8.

الوحدة الدولية IU، في الصيدلة، هي وحدة قياس لمقدار مادة متفق عليه عالمياً، تبعاً للمادة المقيسة، ويعتمد الفارق بين الوحدات الدولية للمواد المختلفة على النشاط أو المفعول الحيوي لهذه المواد بغرض تسهيل المقارنة بينها. على سبيل المثال تستخدم وحدات دولية لتوصيف الفيتامينات والهرمونات وبعض الأدوية واللقاحات والمستحضرات الدموية ومواد فعالة حيوياً مماثلة. تعطى عادة المقادير المقابلة للوحدة الدولية مقدرة بالغرام وأجزائه أو بوحدات الحجوم المقابلة.

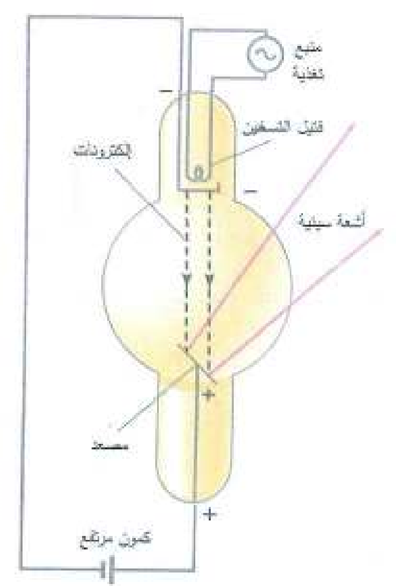
الفصل الخامس

الأشعة السينية وتطبيقاتها

X- Rays & Applications



اكتشف رونتجن (1845-1923) أنه عندما تسرّع الإلكترونات بكمون مرتفع في أنبوب انفراغ ويسمح لها بالسقوط على سطح زجاجي أو معدني داخل الأنبوب، تتوهج بعض الفلزات المتفلورة fluorescent minerals التي تقع على بعد معين من الأنبوب ويصبح فلم التصوير الضوئي معرّضاً. وقد عزا رونتجن هذه الآثار لأي نوع من الإشعاع يختلف عن الأشعة المهبطية. أطلق عليها اسم الأشعة السينية X-rays تبعاً للرمز الجبري X، الذي يعني مقداراً مجهولاً. وسرعان ما اكتشف أن الأشعة السينية تخترق بعض المواد بشكل أكبر منه في حالة المواد الأخرى، وقدم خلال بضعة أسابيع أول صورة بالأشعة السينية (الشكل5.2) (تمثل صورة ليد زوجته). يتم توليد الأشعة السينية حالياً عادة باستخدام أنبوب يشبه أنبوب رونتجن (الشكل5.1)، باستخدام كمونات تقدر في الحالة النموذجية من 30kV إلى 50kV.



الشكل5.1. أنبوب الأشعة السينية. تسرع الإلكترونات الصادرة عن فتيل مسخن في أنبوب مفرغ بكمون مرتفع. وعندما تسقط هذه الإلكترونات على سطح المصعد، تصدر الأشعة السينية.

دلت الدراسات حول طبيعة الأشعة السينية أنها ليست جسيمات مشحونة (كالإلكترونات) نظراً لأنها لا تنحرف بوجود الحقل الكهربائي أو المغنطيسي. وقد افترض أنه يمكن أن تكون شكلاً من أشكال الضوء غير المرئي.

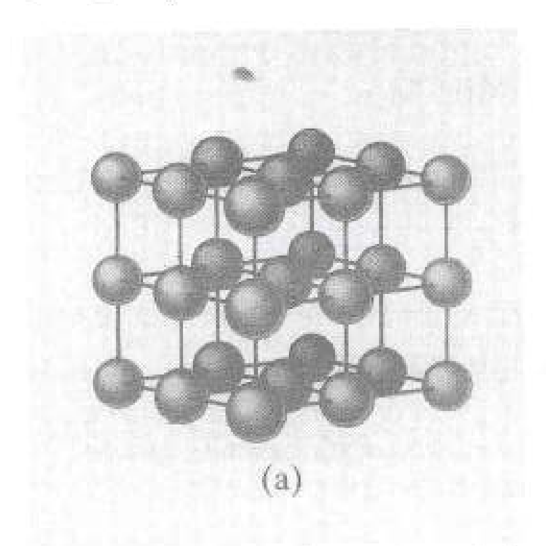


الشكل5.2. صورة يد بالأشعة السينية

5.1. انعراج الأشعة السينية

غير أن هذه الأشعة لم تبد آثار الانعراج diffraction أو التداخل interference باستخدام شبكات انعراج عادية (راجع الفصل3). إذا كانت أطوالها الموجية في الحقيقة أصغر بكثير من التباعد 10^{-6}m $(=10^{3}$ nm$)$ في الشبكات النموذجية، فمن غير المتوقع

الحصول على أي أثر. وفي عام 1912 افترض ماكس فون لاو (1879-1960) Max Von Laue أنه إذا كانت الذرات في بلورة مرتبة على شكل صفيف منتظم (الشكل5.3) يمكن لمثل هذه البلورة أن يؤدي دور شبكة انعراج للأطوال الموجية القصيرة جداً التي تبلغ مرتبة التباعد بين الذرات، الذي يقدر بنحو $10^{-10}\text{m}\ (=10^{-1}\text{nm})$.



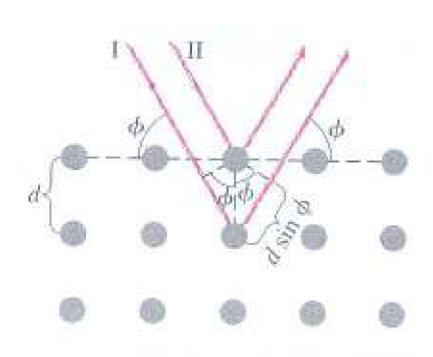
الشكل5.3. الترتيب الذري في جسم صلب بلوري.

سرعان ما برهنت التجارب على أن الأشعة المنتثرة عن بلورة تظهر فعلاً نموذج انعراج بنهايات عظمى ونهايات صغرى (الشكل5.4). ومِنْ ثَمَّ تبين بآن معاً أن الأشعة السينية تتميز بطبيعة موجية، وأن الذرات مرتبة في البلورات بشكل منتظم. تعرف الأشعة السينية اليوم على أنها إشعاعات كهرطيسية تقع أطوالها الموجية في المجال من 10^{-2}nm إلى 10nm، وهو المجال الذي يتولد بسهولة في أنبوب الأشعة السينية.

رأينا سابقاً أن الضوء ذا الأطوال الموجية الأقصر يوفر مقدرة فاصلة أعلى من الضوء ذي الأطوال الموجية الطويلة عندما ندرس جسماً بالمجهر. ولما كانت الأشعة السينية تتميز بأطوال موجية أقصر بكثير منها في حالة الضوء المرئي، يجب أن تبدي من حيث المبدأ مقدرة فاصلة أعلى. غير أنه يبدو عدم وجود مادة يمكن استخدامها كعدسات للأطوال الموجية القصيرة جداً للأشعة السينية. ولكن تقنية انعراج الأشعة السينية المعقدة والذكية (أو علم البلورات) أثبتت فعاليتها الشديدة في دراسة العالم المجهري للذرات والجزيئات. ففي بلورة بسيطة مثل كلور الصوديوم NaCl، تنتظم الذرات في بنية بلورية مكعبة orderly cubic fashion (الشكل5.5)، تبعد فيها الذرات فيما بينها بالبعد d. لنفرض أن

الشكل5.4. يعد هذا النموذج لانعراج الأشعة السينية أول نموذج رصده Max von Laue في عام 1912 عندما وجه حزمة من الأشعة السينية نحو بلورة من كبريتيد الزنك. وقد تم الكشف عن نموذج الانعراج مباشرة على صفيحة فوتوغرافية.

حزمة أشعة سينية ترد على البلورة بحيث تصنع الزاوية ϕ مع سطحها، وأن الشعاعين اللذين يظهران على الشكل ينعكسان عن مستويين متتاليين من الذرات على النحو المبين. يتداخل الشعاعان تداخلاً بناء إذا كانت المسافة التي ينتقلها الشعاع الأطول I يزيد عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية على المسافة التي ينتقلها الشعاع II. يساوي هذا الفارق $d\sin\phi$. ومِنْ ثَمَّ يحدث التداخل البناء عندما يكون:

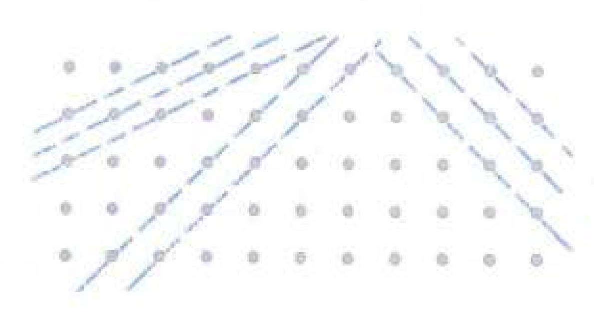


الشكل5.5. انعراج الأشعة السينية عن بلورة.

$$m\frac{\lambda}{2}=d\sin\phi$$ حيث تأخذ m الأعداد الصحيحة

$$m=1,\ 3,\ 5,...$$

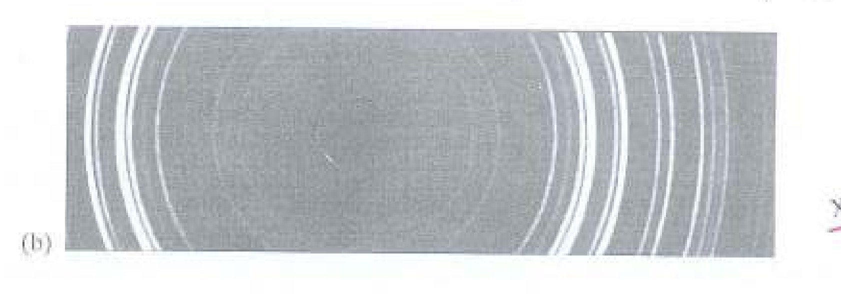
(لاحظ أن ϕ ليست الزاوية بالنسبة إلى الناظم على السطح). وهذا ما يدعى معادلة براغ نسبة إلى W.L.Bragg(1890-1971)، الذي اشتقها، وقام بالتعاون مع والده W.H.Bragg(1862-1942) بابتكار نظرية وتقنية انعراج الأشعة السينية بالبلورات بين عامي 1912-1913. إذا كان الطول الموجي للأشعة السينية معروفاً وقيست الزاوية ϕ يمكن معرفة البعد d بين الذرات. وهذا هو أساس علم البلورات بالأشعة السينية X-ray crystallography.



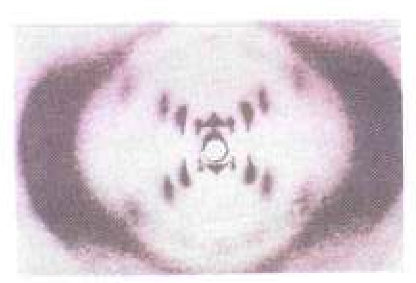
الشكل5.6. يمكن للأشعة السينية أن تنعرج عن الكثير من المستويات في بلورة معينة.

إن نماذج انعراج الأشعة السينية معقدة للغاية. إذ إن البلورة جسم ثلاثي الأبعاد، كما يمكن للأشعة السينية أن تنعرج عن مختلف مستويات البلورة بزوايا مختلفة كما هو مبين في الشكل5.6. يمكن بتحليل نماذج الانعراج عن مادة معينة معرفة الكثير عنها إذا أمكن وضعها في شكل بلوري ولو أن عملية التحليل معقدة.

يتم الحصول في حالة المواد المتعددة التبلور – كما في المعادن أو المساحيق- على سلسلة من الحلقات (الشكل5.7) يقابل كل منها انعراجاً من مرتبة معينة m عن مجموعة معينة من المستويات المتوازية، عوضاً عن سلسلة من البقع (الشكل5.4).



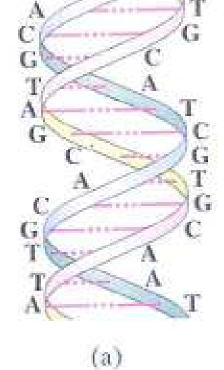
الشكل5.7. (a) انعراج الأشعة السينية عن مادة متعددة التبلور يعطي كما في الشكل(b) مجموعة من الحلقات الدائرية لأستوأسيتات الصوديوم المتعدد التبلور.



الشكل5.8

يظهر في الشكل5.8. صورة حصل عليها روزالند فرانكلين في أوائل الخمسينيات لانعراج الأشعة السينية عن جزيئات الدنا DNA. وقد أوحت البقع المتصالبة أن شكل الدنا لولبي. يبين الشكل 5.9 التمثيل اللولبي للدنا DNA ومساقطه.

5.2. التصوير بالأشعة السينية



(a)

الشكل5.9. مقطع في لولب الدنا المضاعف

حققت الأشعة السينية بعد أن اكتشفها رونتجن في عام 1896، حلم الإنسان القديم في رؤية داخل الجسم من دون بضعه، لكن سرعان ما أسفرت عن خطر إحداث التهابات الجلد الإشعاعية والسرطانات لدى من يتعامل بها، ولو أن قواعد الوقاية من الإشعاع سمحت منذ البداية باستخدامها بأخطار ضئيلة لكن لايستهان بها.

وقد تطور علم الأشعة في آفاق مدهشة، فقد كان يستبدل بالأشعة السينية، تدريجياً، وسائل استكشاف أخرى كالأمواج فوق الصوتية أو التجاوب المغنطيسي النووي.

غير أن التقانة الشعاعية ظلت تعتمد، ردحاً من الزمن، على حزمة الأشعة السينية التي تتخامد في الجسم المدروس تبعاً لامتصاصه لها. وما يزال هذا النوع من التصوير الشعاعي أكثرها شيوعاً في العديد من المجالات ولاسيّما في فحص الصدر والهيكل العظمي.

ويجري إما بالتنظير الشعاعي Radioscopy وإما بالتصوير الشعاعي على فلم. وأما التنظير الشعاعي التقليدي فيستخدم شاشة متفلورة تحدث صورة مضيئة بتأثير الأشعة السينية، في حين أن التنظير الشعاعي المقترن بمضخم للسطوع يسمح بتخفيض الجرعة وبدراسة بنى الجسم ديناميكياً، وفي وضح النهار. غير أن التصوير الشعاعي على الأفلام ما يزال التقانة الأكثر شيوعاً لجودة صورها وضعف جرعاتها مع إمكان الاحتفاظ بها.

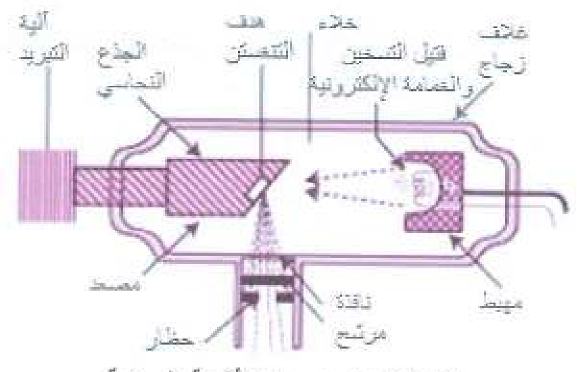
ومن عيوب هذه الطرائق التقليدية أن الصور الحاصلة تتضمن مساقط لمختلف النسج التي تمر بها الأشعة السينية. لذلك تم اللجوء إلى تضييق الحزمة مع إمكان توجيهها إضافة إلى استعمال كواشف مناسبة ما أمكن الحصول على مقاطع متتالية للعضو المدروس، أي تصوير مقطعي Tomography ومع أنه يمكن في هذا التصوير عزل مقاطع معينة في الجسم، ولكن الصور الحاصلة تكون مشوشة. ما

دعا إلى الاستعانة بالحاسوب ومعالجة الصور بمرشحات حاسوبية مناسبة لتحسين الصور فظهر محله التصوير المقطعي المحوسب.

على الرغم من أنه يمكن بالأشعة السينية التقليدية تمييز كل من العظام والبنى الأنبوبية المظلَّلة (كالأنبوب الهضمي والأوعية الدموية والمجاري البولية) بوضوح، فقد ظلت مدَّةً طويلة عاجزة عن تمييز كل من الدماغ والكبد والطحال والبنكرياس ومراكز العديد من الأمراض بشكل مباشر.

لقد سدّ التصوير المقطعي المحوسب الذي بدأ في عام 1974 جزءاً من هذه الثغرة ، وهو يزودنا بمقاطع عرضانية مثالية تتضح فيها البنى التشريحية، وتبايناتها كافية لرؤية أطر الأعضاء إذا لم تكن اختلافات العتامة مرضية كلها. كما أسهمت طرائق جديدة في سدّ جزء آخر من هذه الثغرة بدءاً من عام 1976 وأولها تصوير الصدى(الفصل17) لأطر كل من برنشيم الكبد والطحال والكبد والبنكرياس أو الكليتين، ومِنْ ثمّ صورها بمعالجة الإشارة بشكل ملائم.

وقد تبع ذلك تصوير التجاوب المغنطيسي النووي (الفصل22) الذي يزودنا بصور أكثر غنى وأكثر تبايناً وفق ثلاثة أبعاد. وأخيراً جاء تصوير مغنطيسية الدماغ (الفصل23) ليكشف عن مواقع الخلل في وظائفه المختلفة.



الشكل5.10. صمام الأشعة السينية

5.2.1. أنبوب الأشعة السينية

يتم الاعتماد في طرائق التصوير بالأشعة السينية على صمام الأشعة السينية، ويتكون من (الشكل5.10): المهبط Cathode، وهو سلك من التنغستن يؤدي تسخينه إلى توليد غمامة إلكترونية، يمكن التحكم بعدد الإلكترونات الصادرة في واحدة الزمن التي يرتبط بها إصدار الأشعة السينية ارتباطاً وثيقاً من خلال التحكم بشدة تيار التسخين، ومن المصعد Anode وهو الدريئة التي تكبح حزمة الإلكترونات وتولد الأشعة السينية. يجعل المصعد قابلاً للدوران، ويُبَرَّد بهدف إطالة عمره، بحيث تتحقق تكرارية جيدة للأشعة السينية، وقد أُلحِقَ بالصمام مرشحٌ ومسددٌ مناسبان للتصوير المقطعي.

5.2.2. طبيعة الأشعة السينية وخصائصها

تشكل الأشعة السينية جزءاً من طيف الإشعاعات الكهرطيسية، تقع طاقة فوتوناتها بين $10^{2}eV$ و$10^{5}eV$، وأطوالها الموجية بين $10^{-9}m$ و$10^{-12}m$.

هذا وإن تدفق الفوتونات التي يصدرها المنبع ذو طابع إحصائي، ويعرّف من خلال كل من قيمته الوسطية N، وانحرافه عن القيمة الوسطية $(N)^{1/2}$، ومن ثم بانحرافه النسبي $\frac{\sqrt{N}}{N}$ أي $\frac{1}{\sqrt{N}}$. يعدّ هذا الانحراف، الذي يعرف أيضاً بالتشويش الكمومي، من العيوب الأساسية لجودة الصور.

تمتاز الأشعة السينية، بالإضافة إلى الخصائص العامة للإشعاعات الكهرطيسية، بقدرتها على عبور الجسم البشري، ويكون ذلك أسهل بقدر ما تكون قساوتها أكبر، أي بقدر ما يكون الكمون المستخدم في توليدها كبيراً.

- تتخامد الأشعة السينية، لدى عبورها الجسم، بطرائق مختلفة، وذلك تبعاً للطاقة التي تحملها: فيسود امتصاصها بالمفعول الفوتوكهربائي في حالة الطاقات المنخفضة وبمفعول كومتن في حالة الطاقات المتوسطة (راجع الفقرة 1.1.2) وبمفعول توليد الأزواج في حالة الطاقات المرتفعة، كما يزداد تخامدها (امتصاصها في النسج) بازدياد طول مسارها وهو يخضع للعلاقة الآتية:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

حيث I_0 الشدة الابتدائية للحزمة السينية، I_x شدة الحزمة السينية على بعد x، و μ معامل تخامد (أو امتصاص) الأشعة السينية معبراً عنه بالوحدة cm^{-1}، وهو يتعلق بالإضافة إلى العدد الذري للوسط، بكثافة هذا الوسط، وبطاقة الإشعاع الوارد.

- يجدر بالذكر أن طيف طاقة الأشعة السينية متعدد الألوان، أي يتألف من إشعاعات تختلف في طاقاتها. ولهذا يترتب، ترشيح طيف الطاقة، أي حذف الجزء المنخفض منه الذي يسهم كثيراً في الجرعة الممتصة من دون أن يكون له ثمة دور في القياس (نظراً لتخامده الشديد).

- تتسبب في اسوداد مستحلبات فلم التصوير الضوئي.

- تؤدي إلى تأيين الغازات التي تعبرها، ويستفاد من هذه الخاصية في قياس كمية الأشعة باستخدام حجرات التأيين.

- تنتشر وفق خطوط مستقيمة وفي سائر المناحي، يتطلب تشكيل الصورة الشعاعية الاستعانة ببعض المفاهيم الهندسية البسيطة كالإسقاط والتكبير والتشويش الهندسي.

- تتخامد حزمة الأشعة السينية ذاتياً، طردياً مع مربع بعدها عن المنبع (راجع الفقرة 1.4.1). ويطبق هذا القانون على الأشعة الأولية، كما على الأشعة الثانوية التي تصدر عن المريض بشكل رئيسي.

يجب حفظ، هذا العامل للتخامد في الذاكرة، والوقاية من الأشعة السينية في بعض الحالات، كما هو الحال في الصور الشعاعية السريرية وفي حالة العمليات، ليست مطلقة. ويحظر الوقوف في طريق الأشعة السينية من دون لبس رداء رصاصي بوقف الإشعاعات كلها. وأخيراً تجب معرفة إلى أي مدى يجب الابتعاد عن المنبع.

عندما تخترق حزمة الأشعة السينية ثخانة كبيرة من النسج الرخوة كالجسم البشري مثلاً، يتولد إشعاع ثانوي منتثر يصدر في اتجاهات الفراغ كافة، خلافاً للإشعاع الرئيسي الذي ينشأ حصراً عن الصمام. إن الإشعاع المنتثر الذي يبلغ الفلم يزيد من تشويش الخلفية مما يضعف من تباين الصورة الشعاعية وكمية المعلومات التي تحويها. يتوافر بعض الوسائل التي تقلل من شأن هذا الإشعاع كالحظار والمخاريط والشبكة المضادة للانتثار .

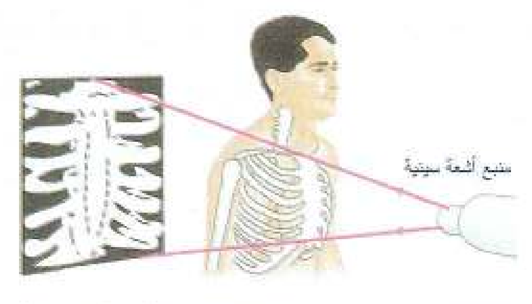
إن حزمة الأشعة السينية تخرج من الصمام متجانسة تقريباً، ثم تعبر الجسم البشري الذي يمتص جزءاً منها، يتناسب في كل رقعة من الجسم مع ثخانة تلك الرقعة وكثافتها وعددها الذري، فتتخامد بشكل غير متساو وتخرج من الجسم غير متجانسة، ويمكن الكشف عنها بوسائل متعددة.

5.2.3. التقنيات الشعاعية وخصائص الصورة الشعاعية

تختلف وسائل الكشف باختلاف التقنية والغرض منها وكلفتها فيوجد تقنية:

5.2.3.1. التصوير الشعاعي التقليدي

تمر الأشعة السينية البارزة من الأنبوب في هذه الطريقة من التصوير، في الجسم وتكشف بفلم تصوير ضوئي أو بشاشة متفلورة، (الشكل5.11). وهو يستخدم أفلاماً من دون شاشات داعمة في تصوير الأعضاء القليلة الثخانة والتي يمكن تثبيتها بسهولة (كاليد والقدم)، وحافظات في تصوير الأعضاء الأكثر ثخانة كالأطراف، وحافظات



الشكل5.11. التصوير التقليدي بالأشعة السينية الذي يمثل التظليل shadowing عملياً.

وشبكة مضادة للانتثار في الفحوص الأخرى. كما يمكن اللجوء إليه في **الفحوص باستخدام مستحضر تباين لتحسين الصورة.**

يجب أن تتمتع الصورة الشعاعية بأكبر قدر ممكن من التباين ومن النقاوة. وأما التباين Contrast في الصور الشعاعية فيمثل التفاوت بين الرقع السوداء والرقع البيضاء على الصورة السلبية، ويتعلق بالشروط التقانية للحصول عليها، كما يتعلق بحدة نظر المراقب.

تزودنا الأشعة السينية الضعيفة الاختراق أو متوسطته، بصور سلبية شديدة التباين. يستخدم هذا النوع من الأشعة بخاصة في الصور الشعاعية للعظام: فيكون التباين شديداً بين العظم (الذي يبدو أبيض) والأعضاء الرخوة. كما تستخدم الأشعة السينية في تصوير المناطق التي تتصف بالامتصاص الشديد لمستحضرات التباين اليودية المستخدمة في تظليل المجاري البولية والأقنية الصفراوية والأوعية الدموية.

يؤدي تخامد حزمة الأشعة السينية في الجسم البشري إلى إصدار أشعة منتثرة في سائر المناحي، يحتمل أن تؤثر في الصورة الشعاعية بشكل متجانس تفقد معه الصورة تباينها. يضاف إلى ذلك **التشويش الحركي** الذي ينشأ عن حركة الجسم أو العضو المدروس. ويضعف بشدة مع قصر زمن اللقطة. ما يتطلب أحياناً استعمال **الشاشات الداعمة**، التي تسمح بتقصير زمن اللقطة ولكنها تؤدي إلى تشويش يزداد تأثيره بازدياد فعاليتها.

تراقب الصورة الشعاعية، بعد الحصول عليها، من خلال منظار الصورة السلبية negatoscope لاستخلاص أكبر قدر من المعلومات. كما يوضع بين العين والمنطقة من الفلم التي يطلب دراستها جذع مخروط من الورق المقوى طوله 20 سنتمتراً، إذا شئنا تحليل بعض التفاصيل بدقة.

5.2.3.2. التنظير الشعاعي التقليدي radioscopy

وهو يستخدم شاشة متفلورة تتألق بفعل الأشعة السينية، ولكن إضاءتها ضعيفة جداً يصعب معها مزاولة هذه التقنية في غير الظلام. ولا بد من مرور عشر دقائق على الأقل للتكيف مع الظلام. وقد عزف عنه حالياً بسبب التشعيع الكبير الذي ينجم عنه.

يمكن التقاط صور ضوئية للخيال المتشكل على شاشة التنظير الشعاعي التقليدي بآلة تصوير ضوئي. تستخدم هذه التقنية عادة في تقفي الالتهابات الرئوية.

5.2.3.3. التنظير الشعاعي المتلفز televised radioscopy

نحصل على الخيال في هذا النمط من التنظير الشعاعي بعُشر الجرعة السينية الضرورية للقيام بالتنظير الشعاعي التقليدي ضمن الشروط نفسها. كما يمكن مراقبة الصورة التي تتشكل على شاشة المستقبل التلفزيوني في وضح النهار، إلّا أنه يمكن لهذه التقنية أن تطيل زمن التعرض كثيراً. يسمح التنظير الشعاعي بإجراء دراسة دينميكية. ومن عيوبه أنه لا يترك أي وثيقة (ما لم يسجل على شريط مغنطيسي magnetoscope أو سينمائي radiocinema) ومن جهة أخرى يسمح التنظير الشعاعي بترشيد الإبر والقثاطر والأدلة العاتمة في بعض الفحوص الراديولوجية.

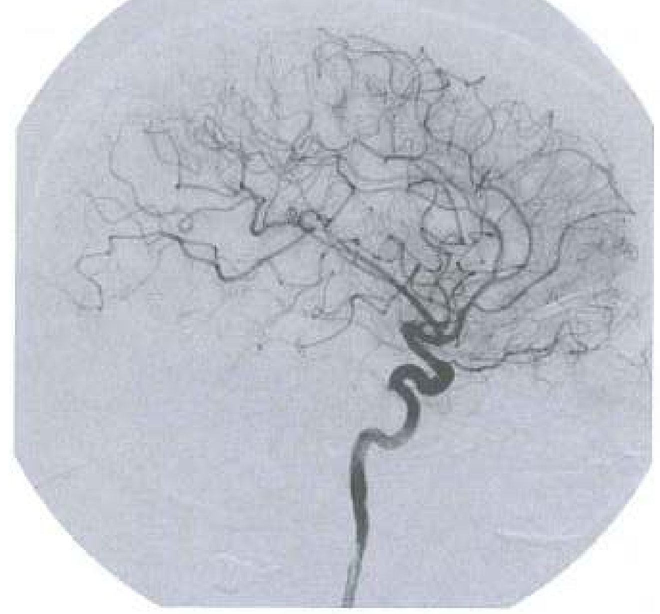
5.2.3.4. التصوير الرقمي المتلفز

وهي تقانة حديثة، يعاد فيها التقاط الصورة المتشكلة على شاشة مضخم السطوع الثانوية عن طريق محوّل converter تمثيلي analogic / رقمي digital يقوم بتعيين رقم لكل نقطة منها، تسمح الأجهزة الحالية بتمثيل ما يزيد على مئتي قيمة للسطوع بين الإضاءة العظمى والظلام. يبلغ عدد عناصر الصورة نحو 250,000 pixel (يمثل عدد عناصر مصفوفة الصورة)، وربما تزداد جودة هذه الأجهزة في المستقبل القريب.

تحفظ هذه الصورة الرقمية في ذاكرة مغنطيسية (غالباً على شكل أقراص disc) تتسع لأكثر من ألف صورة إجمالاً، ليقوم الحاسب بمعالجتها (بطرحها من صورة أخرى مثلاً) من دون النيل من جودتها ومن ثم إعادة تشكيلها على شاشة مستقبل تلفزيوني في شكلها المألوف عن طريق محوّل رقمي / تمثيلي.

5.2.3.5. التصوير الوعائي الرقمي

يعد التصوير الوعائي الرقمي (الشكل5.12) من تطبيقات التصوير الرقمي المتلفز الرئيسية. يؤدي حقن مستحضر تباين داخل الوريد إلى زيادة التباين داخل الأوردة فالشرايين حتى في مناطق بعيدة عن نقطة الحقن. يسمح إمكان تمييز أكثر من مئتي صبغة، في الواقع، بتقصي أثر تراكيز ضئيلة من مستحضر التباين في وعاء دموي وذلك بمعالجة الصورة. أي بإجراء عملية طرح الصورة التي حصل عليها قبل حقن مستحضر التباين، فلا يبقى على الصورة النهائية سوى صورة الوعاء شريطة أن نحسن اختيار نافذة الدراسة كي نتمكن من الوقوف على منطقة الكثافات المهمة،فما يجب أخذه في الحسبان فقط الاختلاف الكائن بين الأوعية المحقونة والأعضاء التشريحية الأخرى المطروحة.



الشكل5.12. نموذج لصورة وعائية حصل عليها بالطرح الرقمي.

تسمح هذه التقنية بإجراء التصوير الوعائي بعد الحقن داخل الوريدي من دون تخدير ومن دون أي خطر يرتبط بالوخز الشرياني.

تسمح زيادة جودة هذا النوع من الأجهزة باستخدامها في التصوير الوعائي القلبي، الأمر الذي يؤدي إلى تخفيض الفحوص باستخدام القثطرة .

تطورت تقانات التصوير الرقمي بسرعة واحتلت مكانة مرموقة في تقصي آثار الإصابات العصيدية.

5.2.4. الأجهزة الشعاعية

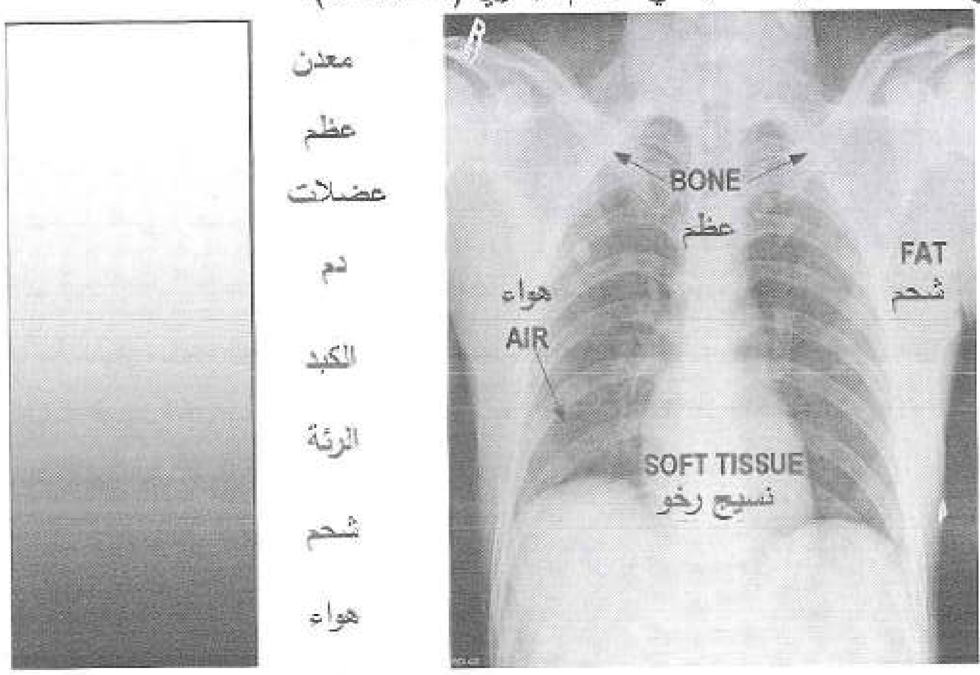
تتألف مناضد الفحص من منصة أفقية (أو شاقولية)، يسهل وضع حافظة في داخلها على تماس مع شبكة مضادة للانتثار. يوضع صمام الأشعة السينية بحيث يقابل الحافظة.

تسمح المناضد الموجهة عن بعد بالإضافة إلى مضخم السطوع وجهاز الاستقبال التلفزيوني بإجراء جميع فحوص الترشيد بالتنظير الشعاعي وبخاصة في الفحوص الهضمية. وعندما يكون العامل على الأجهزة على مقربة من المنضدة، فتجري وقايته من الإشعاع بدرع رصاصي.

5.2.5. الكثافات الشعاعية المختلفة

تضم كليشة التصوير الشعاعي تدرجاً للكثافات الشعاعية بين الأبيض والأسود، تنتج هذه الكثافات المختلفة عن اختلاف النسج في امتصاصها للأشعة السينية. حيث يتعلق الامتصاص، في حالة الثخانة نفسها، بالكتلة الذرية للوسط. فالجزيئات المكونة من ذرات ثقيلة كالكالسيوم واليود والباريوم تمنع الأشعة السينية من بلوغ الفلم ونحصل، من وجهة النظر الشعاعية، على رقعة بيضاء نسبياً على فلم التصوير الشعاعي. وبالعكس يتأثر الفلم بشدة بالأشعة السينية إذا لم يكن سوى الهواء يفصل بينه وبين المنبع، فيصبح أسود.

هناك أربع كثافات شعاعية أساسية في الجسم البشري (الشكل5.13):



الشكل5.13. صورة تظهر الكثافات الأساسية الأربع.

– الكثافة الكلسية Bone وينتمي إليها العظام ومستحضرات التباين العاتمة كلّها كاليود والباريوم.

- الكثافة المائية soft tissue وينتمي إليها مختلف النسج البرنشيمية (كالكبد والطحال والكلية والدماغ ...) والعضلات والأوتار والأربطة والغضاريف والسمحاق والأوعية والدم والسائل النخاعي الشوكي ....إلخ .
- الكثافة الدهنية Fat وينتمي إليها النسيج الخلوي تحت الجلد والشحم الذي يحيط بعدد من الأعضاء.
- الكثافة الهوائية Air وتنتمي إليها البنى كلّها التي تحوي الهواء كالرغامى والقصبات والأسناخ الرئوية والجيوب الجبهية وبعض أجزاء الأنبوب الهضمي.

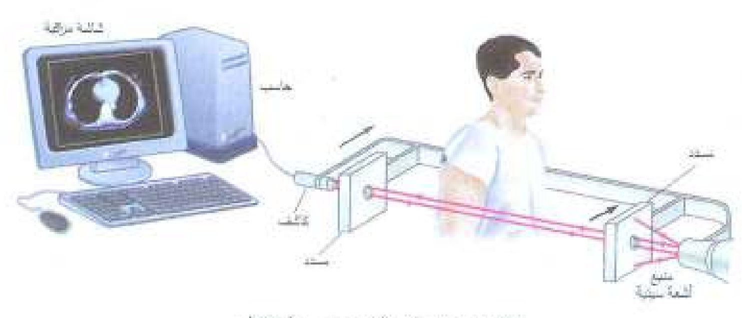
5.2.6. التصوير المقطعي المحوري

يطلق اسم الماسح Scanner على الجهاز الذي يصور مقاطع في الجسم البشري بالأشعة السينية وبالاستعانة بالحاسب وله عدة مرادفات منها، قياس الكثافة المقطعية tomodensitometry، والتصوير المقطعي المحوري العرضاني المحوسب Computed transverse axial Tomography و CT scan Computed Tomography scan. وقد كان هاونسفيلد Hounsfield من ابتكر هذا الجهاز عام 1972 في إنكلترا.

يسمح التصوير المقطعي بتجنب التراكبات المزعجة وتصوير مقطع في منطقة معينة من الجسم. يمكن حالياً رؤية البنيات والإصابات التي كان يتعذر إظهارها سابقاً، بوضوح كبير.

5.2.6.1. مبدأ التصوير المقطعي

في التصوير المقطعي الشكل5.14، تعبر حزمة مسددة دقيقة من الأشعة السينية الجسم نحو كاشف يقيس الشدة النافذة. يتم أخذ القياسات عند عدد كبير من النقاط لدى انتقال المنبع والكاشف معاً في جوار الجسم. ثم يتم تدوير الجهاز زاوية صغيرة حول محور الجسم ويجري مسحه ثانية؛ تتكرر هذه العملية ربما بفواصل مقدار كل منها $1°$ ولأجل $180°$. ترسل شدة الحزمة النافذة لنقاط كل مسح الكثيرة ولكل زاوية إلى حاسب يقوم ببناء صورة الشريحة وتعرض على شاشة تلفزيونية. لاحظ أن الشريحة المصورة عمودية على المحور الكبير للجسم. لهذا السبب، يدعى هذا النوع من التصوير أحياناً التصوير المقطعي المحوري المحوسب computerized axial tomography (CAT)، ولو أن الاختصار CAT كما في CAT scan يمكن قراءته على النحو computer-assisted tomography.

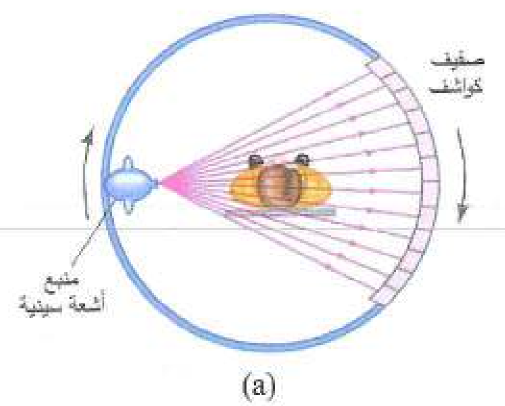


الشكل5.14. التصوير المقطعي

يبين الشكل5.15 كيفية دوران أنبوب الأشعة السينية والكاشف حول الجسم بحيث يمكن لحزمة الأشعة أن تمسح المقطع المراد تصويره.


الشكل5.15. الماسح المستخدم في التصوير المقطعي المحوسب.

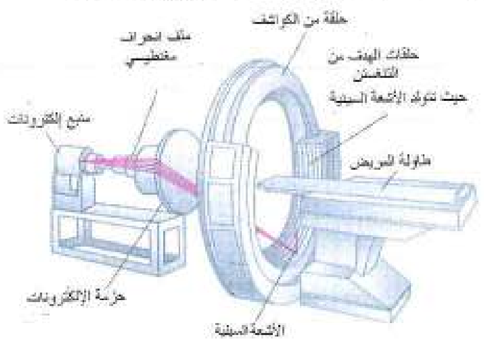
يستغرق استخدام كاشف واحد كما في الشكل5.14 بضع دقائق لإجراء المسوحات العديدة الضرورية لتشكيل صورة كاملة. غير أن المسوحات الأسرع بكثير تستخدم مجموعة من الحزم الدقيقة ومجموعة من الكواشف (الشكل5.16a) يتم فيها الكشف عن الحزم التي تعبر كامل المقطع في الجسم، في آن واحد، بالعديد من الكواشف. ثم يتم تدوير المنبع والكواشف حول الجسم، ولا تستغرق الصورة إلاّ بضع ثوان. أما الأجهزة الأسرع ومِنْ ثَمَّ المفيدة لمسوحات القلب فهي أجهزة المنبع فيها ثابت توجه حزمة الإلكترونات فيها (بحقول مغنطيسية نحو أهداف من التنغستن تحيط بالمريض، محدثة الأشعة السينية (الشكل5.16b) .



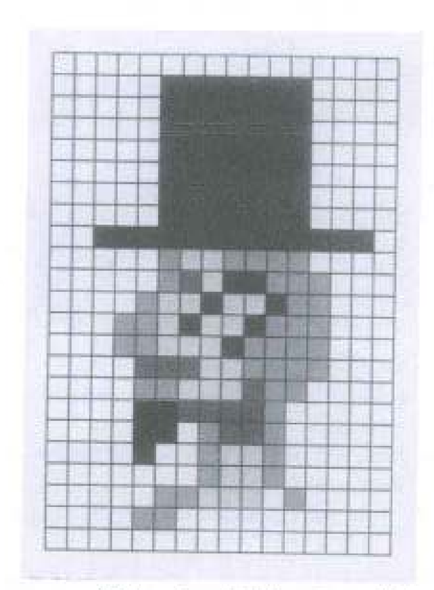
الشكل5.16a. ماسح ذو حزمة مروحية. إذْ تقاس الأشعة النافذة من كامل المقطع في الوقت نفسه عند كل زاوية. يدور كل من المنبع والكاشف لأخذ قياسات عند زوايا مختلفة.

5.2.6.2. تشكل الصورة

ولكن كيف يتم تشكيل الصورة؟ يمكن النظر إلى الشريحة التي يجري تصويرها بأنها مقسمة إلى العديد من العناصر الحجمية volume elements (أو الفوكسلات voxels)، التي يمكن أن تكون على شكل مكعبات. يتم اختيار عرض كل فوكسل في التصوير المقطعي المحوري وفقاً لعرض الكواشف أو عرض حزم الأشعة السينية أو كليهما، وهذا ما يحدد المقدرة الفاصلة للصورة والتي يمكن أن تكون ملمتراً واحداً. يقيس كاشف الأشعة السينية شدة الحزمة النافذة. وعندما تطرح هذه القيمة من شدة الحزمة عند المنبع نحصل على الامتصاص الكلي (ويدعى مسقط) وفق خط الحزمة.



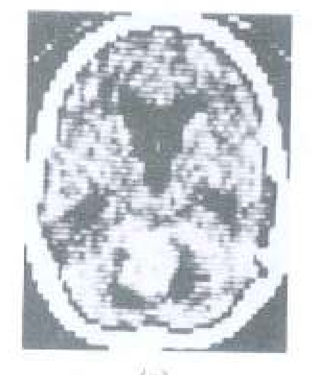
الشكل5.16b. في نوع آخر للماسح، يتم توجيه حزمة من الإلكترونات من المنبع بحقول مغنطيسية نحو أهداف من التنغستن تحيط بالمريض.



الشكل5.17. مثال لصورة مؤلفة من عدد كبير من المربعات أو البكسلات الصغيرة والعديدة، ولو أن المقدرة الفاصلة لهذه الصورة هزيلة.

تستخدم تقنيات رياضية معقدة لتحليل مساقط الامتصاص للعدد الضخم من مسوحات الحزمة المقيسة (انظر الفقرة الجزئية التالية)، والحصول على الامتصاص في كل فوكسيل. يتم الحصول على الصورة بتحويل كل فوكسل إلى بكسل أي إلى عنصر صورة picture element يتميز بدرجة من الرمادية تبعاً لامتصاص الفوكسيل المقابل، أي تتألف الصورة الشكل5.18 من بقع (بكسلات) صغيرة تختلف بدرجاتها الرمادية. غالباً ما يتم ترميز مقدار الامتصاص لونياً. ليس للألوان في صورة الألوان الاصطناعية أي علاقة باللون الحقيقي للجسم.

يبين الشكل5.18 صورتين مقطعيتين بمقدرتين فاصلتين مختلفتين، يبدي كل منهما مقطعاً في الدماغ. غير أن المقدرة الفاصلة للصورة (a) ضعيفة، في حين أن المقدرة الفاصلة للصورة (b) أعلى ويظهر فيها ورم دماغي (الرقعة الأكثر عتامة إلى اليمين). يعتقد عموماً أن المسح في التصوير المقطعي قد أحدث ثورة في مجالات الطب بتوفير تشخيص أقل ضرراً بكثير، أو أكثر دقة أو كليهما.



(a)

(b)

الشكل5.18.

يمكن تطبيق التصوير المقطعي المحوسب أيضاً على التصوير بالأمواج فوق الصوتية وعلى إصدارات النظائر المشعة وعلى التجاوب المغنطيسي النووي.

5.2.6.3. إعادة بناء صورة التصوير المقطعي

كيف يمكن لرمادية أي بكسل أن تتحدد حتى لو كان كل ما نقيسه هو الامتصاص الكلي وفق كل خط حزمة في الشريحة؟ لا يمكن إجراء ذلك إلّا باستخدام الكثير من مسوحات الحزمة التي تجرى عند زوايا مختلفة. لنفرض أن الصورة ستكون صفيفاً مكوناً من $10^4 = 100 \times 100$ عنصر صورة. فإذا كان لدينا 100 كاشف تقيس مساقط الامتصاص عند مئة زاوية مختلفة، فإننا

نحصل على 10^4 جزءاً من المعلومات (جزء المعلومة يمثل قيمة الامتصاص أو التخامد الذي يطرأ على حزمة الأشعة السينية التي يقيسها كاشف محدد من أجل زاوية محددة). من هذه المعلومات يمكن بناء صورة المقطع، ولكن بدقة تتناسب مع عدد عناصر الصورة. فإذا جرى القياس عند مزيد من الزوايا، يمكن أن يكون بناء الصورة أكثر دقة.

للتعرف على كيفية القيام ببناء الصورة رياضياً، ندرس حالة بسيطة للغاية باستخدام تقنية تكرارية. لنفترض أن الشريحة العينة قد قسمت إلى 2×2 عنصر صورة كما هو مبين في الشكل 5.19. يمثل العدد في كل بكسل مقدار امتصاص المادة في تلك المساحة بشكل نسبي: (ولنقل بالعشرات المئوية): أي إن 4 يمثل ضعف امتصاص 2. ولكننا لا نستطيع قياس هذه القيم مباشرة – فهي المجاهيل التي يجب الحصول عليها. كل ما نستطيع قياسه هي المساقط– الامتصاص الكلي وفق خط الحزمة– حيث تظهر هذه القيم في المخطط على أنها مجموع الامتصاصات للبكسلات وفق كل خط من أجل أربع زوايا مختلفة. وهذه المساقط (التي تعطى في نهاية كل سهم) هي ما نستطيع قياسه، ونريد أن نعود للعمل منها لنرى مدى قربنا من قيمة الامتصاص الحقيقية لكل بكسل. نبدأ تحليلنا وقد تم تعيين قيمة الصفر لكل بكسل (الشكل5.19a). في التقنية التكرارية، نستخدم المساقط لتقدير قيمة الامتصاص في كل مربع، ونكرر من أجل كل زاوية. وأما مسقطا الزاوية 1 فهما 7 و 13. نقسم كلاً من هذين المسقطين بالتساوي بين مربعي كل منهما: فيكون نصيب كل مربع في العمود الأيسر 3.5 (نصف7)، ونصيب كل مربع في العمود الأيمن 6.5 (نصف 13)، انظر الشكل 5.19b. ثم نستخدم المساقط عند الزاوية 2. نحسب الفارق بين المساقط المقيسة عند الزاوية 2 (6 و14) والمساقط التي تعتمد على التقدير السابق (الصف العلوي: $3.5+6.5=10$، الأمر نفسه من أجل الصف السفلي). ثم نوزع هذا الفارق بالتساوي على المربعين في ذلك الصف. لدينا، في حالة الصف العلوي:

$$6\tfrac{1}{2}+\frac{6-10}{2}=4\tfrac{1}{2} \quad \text{و} \quad 3\tfrac{1}{2}+\frac{6-10}{2}=1\tfrac{1}{2}$$

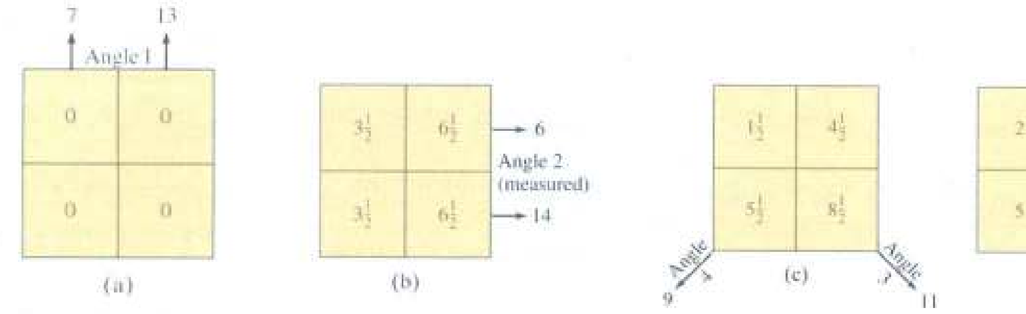
وفي حالة الصف السفلي:

$$6\tfrac{1}{2}+\frac{14-10}{2}=8\tfrac{1}{2} \quad \text{و} \quad 3\tfrac{1}{2}+\frac{14-10}{2}=5\tfrac{1}{2}$$

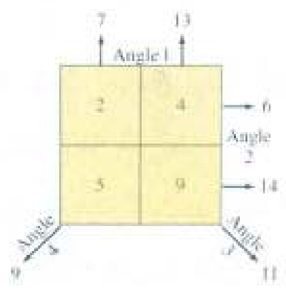
يتم إدخال هذه القيم، كما هو مبين في الشكل 5.19c. ثم المسقط عند الزاوية 3 يعطي (إلى اليسار في الأعلى) $1\tfrac{1}{2}+\frac{11-10}{2}=2$ و (إلى اليمين في الأسفل) $8\tfrac{1}{2}+\frac{11-10}{2}=9$، وأنه يعطي في حالة الزاوية 4 (الأسفل إلى اليسار) $5\tfrac{1}{2}+\frac{9-10}{2}=5$ و (الأعلى إلى اليمين) $4\tfrac{1}{2}+\frac{9-10}{2}=4$.

النتيجة المبينة في الشكل 5.19d، تقابل بالضبط القيم الحقيقية. تكون القيم الحقيقية، في الحالات الحقيقية، غير معروفة، ولهذا السبب ثمة حاجة لهذه التقنيات الحاسوبية. ولقد استخدمنا للحصول على

هذه الأعداد بالضبط، ستة أجزاء من المعلومات (اثنتان في كل من الزاويتين 1 و2 ومعلومة عند كل من



الزاويتين 3 و4). في حالة عدد أكبر بكثير من البكسلات المستخدمة في الصور الفعلية، لا يتم الوصول إلى القيم الحقيقية عموماً بسهولة. يمكن أن نحتاج إلى عدد كبير من التكرارات، وينظر إلى الحساب على أنه دقيق إلى حد كاف عندما يكون الفارق بين المساقط المحسوبة والمقيسة صغيراً إلى حد كاف. يوضح المثال أعلاه تقارب العملية: حيث أدى التكرار الأول (من b إلى c في الشكل5.19) إلى تغيير القيم بمقدار 2، وأما التكرار الأخير فلم يغير القيم إلّا بمقدار $\frac{1}{2}$.



الشكل5.19. صورة بسيطة تظهر قيم الامتصاص الحقيقية والإسقاطات المقيسة.

5.2.7. مبدأ الماسح وقياس الكثافة المقطعية

يعتمد الماسح، كما ذكرنا، على الأشعة السينية، ولكنه يستبدل بفلم التصوير الشعاعي، كاشف إلكتروني، يحول الأشعة السينية التي يستقبلها إلى إشارة كهربائية.

إن هذا الكاشف أكثر حساسية بكثير من فلم التصوير الضوئي، ويسمح بكشف الاختلافات الضئيلة في امتصاص الأشعة السينية، ففي الجمجمة مثلاً يختلف كل من الدماغ والسائل النخاعي الشوكي والورم الدموي في امتصاصه للأشعة السينية، ويمكن تمييز كل منها على الصورة المقطعية دون حاجة لاستخدام مستحضر للتباين.

يستخدم الماسح حزمة دقيقة من الأشعة السينية تدور حول الجسم المطلوب فحصه، فتمسح بذلك مقطعاً فيه، تتعين ثخانته بعرض الحزمة ولهذا، يطلق على هذه الطريقة التصوير المقطعي المحوري، أي تستكشف الجسم في مقطع يتعامد مع المحور الكبير للجسم.

إن الكاشف الإلكتروني الذي يتكون إما من بلورة ومضانية أو من حجرة تأيين، والموجود في الجهة المقابلة للصمام يسمح بقياس التخامد الذي طرأ على الحزمة السينية على طول مسارها وفي كل موقع فراغي لها ويحفظه في ذاكرة مغنطيسية. وفي نهاية حركة المسح، تكون الذاكرة قد سجلت عدداً كبيراً من

القياسات المتقاطعة فيما بينها. أما الحاسوب المرافق فيعين إسهام كل حجم عنصري voxel في تخامد الحزمة ومن ثم إعادة بناء رياضية لصورة المقطع الذي مسحته الحزمة بالاعتماد على هذه المعطيات وذلك باتباع إحدى طريقتين:

- إما الحساب المصفوفي، ومن عيوبه أنه يتطلب مدة طويلة، ولا يبدأ إلّا في نهاية المسح.
- وإما بالحساب بطريقة التلاف convolution، المشتقة من تحويلات فورييه وهي أكثر سرعة.

ونتيجة لذلك يسند لكل حجم عنصري رقم يماثل معامل تخامد الأشعة السينية فيه أو كثافته الشعاعية ثم تعالج هذه المعلومات.

5.2.8. مبادئ أولية عن الحساب المصفوفي

المصفوفة هي جدول أو مربع أو مستطيل مكون من عناصر (لكل منها قيمة) وتتجمع وفق سطور أو أعمدة، فإذا كان m عدد السطور، وn عدد الأعمدة، فإن الجداء (m x n) يميز المصفوفة. يمكن إجراء حسابات على سطور المصفوفة وعلى أعمدتها أو على أقطارها. كما يمكن جمع عدة مصفوفات أو طرحها أو ضربها.

لنأخذ مصفوفة عنصرية مكونة من 2×2 عنصراً $\begin{matrix} W & X \\ Y & Z \end{matrix}$

وتعطي أربع معادلات a, b, c, d:

$$a \to W+X=12 \quad b \to W+Y=10$$
$$c \to Y+Z=5 \quad d \to X+Z=7$$

لهذه المعادلات الأربع حلّان: $\begin{matrix} 5 & 7 \\ 5 & 0 \end{matrix}$ و $\begin{matrix} 8 & 4 \\ 2 & 3 \end{matrix}$

يتضح بسهولة أنه إذا عرفنا جموع السطور والأعمدة فقط لا يكفي لمعرفة المصفوفة نظراً لوجود عدة حلول، الأمر الذي يتطلب معلومات إضافية كالجمع الوتري: $e \to X+Y=8$

ونحصل على الحل كما يلي:

$$(a+b)=2W+X+Y=12+10=22$$
$$(a+b-e)=2W=22-8=14 \quad \to W=14/2=7$$
$$Y=10-7=3 \text{ و } Z=5-3=7-5=2$$

ومِنْ ثمّ فإن حل المصفوفة هو: $\begin{matrix} 7 & 5 \\ 3 & 2 \end{matrix}$

لنأخذ مصفوفة أكبر مكونة من 5×5 عنصراً، فلا يمكن من خلالها إلّا القيام بعدد من الجموع يساوي $5+5$ جمعاً للسطور والأعمدة و14 جمعاً قطرياً. كما يمكن بالقياس القطري معرفة قيم العناصر الزاويّة الأربع. غير أن مجمل هذه المعطيات $28=(4+14+10)$ لا يسمح بحساب قيم العناصر الواحد

والعشرين المجهولة الباقية، لأنه لا يدخل في كل جمع سوى خمسة عناصر ويترتب إضافة جموع عدد من السطور المائلة إلى هذه القيم. وللحصول على حل صحيح لمصفوفات عديدة العناصر يجب أن يكون لدينا عدد من الجموع (ما بين سطور وأعمدة وأقطار وسطور مائلة) يساوي 2 إلى 3 أضعاف عدد العناصر، ويكون عدد القياسات بحيث لا يمكن إلا للحاسب فقط معالجة هذه المسألة بفعالية. وإذا استبدلنا بالرقم الخاص بكل عنصر صبغة رمادية تتفق معه فإننا نحصل على صورة مصفوفية يتأكد من خلالها:

- أن وضوح الصورة يرتبط بعدد عناصر المصفوفة $n\times m$ وتكون دقيقة بقدر ما يكون عدد الصفوف والأعمدة كبيراً.
- أن غنى الصورة يرتبط بعدد الصبغات الموافقة لقيم المعطيات.

5.2.9. تطور مقاييس الكثافة المقطعية (الماسح)

تطور ماسح التصوير المقطعي سريعاً في سبعينيات القرن الماضي. وقد ظهر منه أربعة أجيال خلال أربع سنوات، انخفضت المدة التي كان يستغرقها في اقتناء معطيات مقطع في الجسم من خمس دقائق إلى ثانيتين.

5.2.9.1. ماسح الجيل الأول (الشكل5.20)

وقد كان يستخدم أنبوباً يولد حزمة دقيقة من الأشعة السينية وكاشفاً ومضانياً. وكان يجمع بين الحركتين الانسحابية والدورانية لمجموعة الأنبوب والكاشف. وقد كان يستغرق عدة دقائق في اقتناء المعطيات. وقد كانت تشكل حركة العضوية عقبة كبيرة في تطبيقات هذا الماسح في مناطق غير الرأس والأطراف.



الشكل 5.20. الحركة الانسحابية الدورانية في ماسح الجيل الأول.

5.2.9.2. ماسح الجيل الثاني (الشكل5.21)

كان يستخدم مجموعة من الحزم السينية الدقيقة ومجموعة من الكواشف الومضانية، وقد تميز الجيل الثاني بالانخفاض الملحوظ في مدة اقتناء البيانات مقارنة بما سبقه ومِنْ ثَمَّ التقليل من شأن الخادعات الناجمة عن الحركة في صور الصدر والبطن. يجري فيه اقتناء معطيات مسقط شريحة واحدة في كل مرة باستخدام مجموعة من الحزم السينية الدقيقة ومن الكواشف. تتكون الكواشف في هذا الماسح إما من بلورات (NaI) ثم



الشكل5.21. ماسح الجيل الثاني.

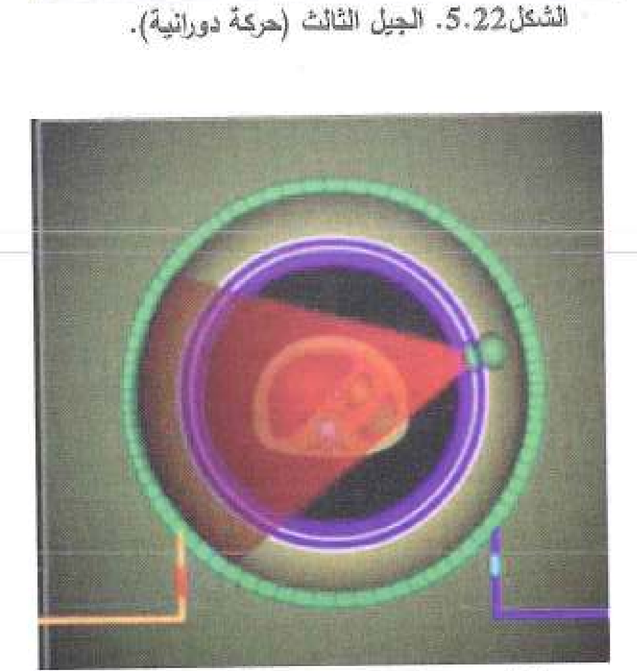
(CsI) أو (BiGeO).

5.2.9.3. الجيل الثالث (الشكل5.22)

وقد تم ابتكار هذا الماسح بعد ازدهار الرياضيات التي يعتمد عليها في التصوير المقطعي المحوسب الذي تقتصر فيه حركة حزمة الأشعة السينية والكواشف على الحركة الدورانية، ويمسح المريض في خمس ثوان، فيوفر بذلك زمن الحركة الانسحابية. يستخدم هذا الماسح حزمة مروحية من الأشعة السينية ومجموعة من الكواشف التي تتكون من حجرات تأيين كزينونية.

الشكل5.22. الجيل الثالث (حركة دورانية).

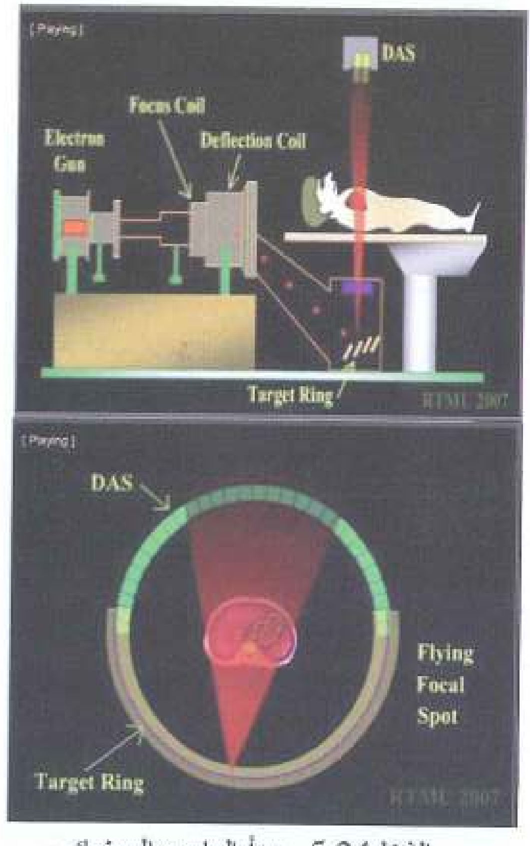
5.2.9.4. وقد تبع ذلك نجاح شركة العلوم الهندسية الأمريكية (AS &E) بتصميم ماسح جديد يتكون من حلقة ثابتة من الكواشف الومضانية وصمام للأشعة السينية في داخل الحلقة يدور حول المريض (الشكل5.23). ويستغرق ثانيتين في مسح مقطع من الجسم. ويمتاز ماسح (GE) بإمكانات معايرة واستجابات كواشفه خلال المسوحات التي يحدث فيها خيال وليس فقط بين المسوحات. وقد أطلق على هذا الماسح مصطلح الجيل الرابع.



الشكل5.23. الجيل الرابع (حركة دورانية)

وقد كان كل من بويد Boyd ومعاونيه من جامعة كاليفورنيا في سان فرانسيسكو يبحثون عن طريقة بديلة لتوليد الأشعة السينية، يتكون جهازهم من مدفع إلكتروني ضخم يطلق حزمة من الإلكترونات، تتحكم ملفات مغنطيسية (موجهة بالحاسب) في توجيهها وتحريكها على هدف من التنغستن مكون من حلقة إلى أربع حلقات تحيط بالمريض، فتتولد حزمة الأشعة السينية عند هذه الحلقات، وتسدد بعد عبورها الجسم نحو مجموعتين إكليليتين من الكواشف لهما مركز الحلقات نفسه (الشكل5.24)، يجري مسح كل مقطع بسرعة كبيرة بالتبئير الإلكتروني. نحصل وفق هذا النمط من التصوير الذي يطلق عليه اسم (النمط

السينمائي) على 30 صورة في أقل من الثانية. وفي نمط المقدرة الفاصلة العالية يمكن الحصول على 10 صورة/ الثانية. وقد جرى تصنيع عدد من هذه الأجهزة في الولايات المتحدة وفي بعض الدول الأخرى. وأصبحت تعرف بفائدتها في التصوير القلبي والعضلات الهيكلية.



الشكل5.24. مبدأ الماسح السينمائي.

لقد أصبح التصوير المقطعي المحوسب حالياً صناعة مزدهرة، ويسهم أساسياً في التشخيص الطبي. ومن الصعب أن نتخيل أن التصوير المقطعي المحوسب السريري لم يكن متوافراً قبل ثلاثة عقود من الزمن، وأن كلاً من اختصاصات العصبية والجراحة العصبية والعظمية ومبحث الجهاز الهضمي، ومبحث الرئويات كان يمارس من دون فائدة. هذا وتستمر تطبيقات التصوير المقطعي في تزايدها. ويعد كل من الصور السطحية والمجسمة في الجراحة الترميمية وقياسات التصوير المقطعي المحوسب الكمية في كل من قياس الكثافة المقطعية للعظام، وخطة العلاج في مبحث الأورام الشعاعية من أحدث التطورات الواعدة.

5.2.10. أنواع حركة الماسح والخيارات التقانية

يمكن أن يؤدي إطلاق مصطلحات الأجيال على أنواع ماسح التصوير المقطعي المحوسب إلى بعض الالتباس، على الرغم من وجودها في اللغة الشائعة، ذلك أنها ربما تجعلنا نقبل أن تعاقب الأجيال يترافق مع التحسن التقاني. ويفضل في الواقع تصنيف مختلف أنواع الماسح تبعاً لمبدئها الفيزيائي.

تتفق الحركة الانسحابية الدورانية التي يستخدم فيها عدة كواشف مع المبدأ الثاني، وتنتمي أجهزة الحركة الدورانية البحتة إلى المبدأ الثالث الذي تنتظم فيه الكواشف وفق شكل مروحي بالنسبة لصمام الأشعة السينية وتدور فيه مجموعة الكواشف بأكملها حول المنطقة المدروسة. أما المبدأ الرابع فيتعلق بدوران الصمام المولّد للأشعة فقط حول المنطقة المدروسة في حين تتوزع الكواشف وفق قوس دائرية تقع زاويتها بين 240^o و 360^o.

غالباً ما توجد عدة خيارات تقانية ممكنة لكل من المسائل المطروحة لدى صنع هذه الأجهزة، وذلك تبعاً لشروط استخدامها والكفاية المطلوبة مع مراعاة الجوانب الاقتصادية.

وما تزال المسائل المطروحة تتطلب خيارات تقانية بين مختلف الحلول الممكنة فيما يتعلق بصمام الأشعة السينية والنظام الميكانيكي للجهاز ونظام الكشف أو خوارزميات إعادة البناء وقد كانت هذه الخيارات مرتبطة باختيار نموذج الحركة نفسه.

5.2.11. مقاييس الكثافة المقطعية بحركتين (انسحابية ودورانية)

وتضم أجهزة الجيلين الأول والثاني حيث يحدث في مستوى المقطع المختار وفي كل موقع زاوي انتقال جانبي (انسحاب) لجملة المنبع والكاشف، يجري خلاله عدد من القياسات، ثم تدور جملة الصمام والكاشف بزاوية معينة حول الشخص الذي يجري فحصه ومن ثم يعاود إجراء سلسلة من القياسات خلال انسحاب آخر ... وهكذا إلى أن تنتهي القياسات اللازمة كلّها.

ومن عيوب هذين الجيلين أن النظام الميكانيكي فيهما معقد نوعاً ما، إذ إنه يجب القيام بحركتين مختلفتين، الأمر الذي يتعذر معه الحصول على مقاطع خلال مدة قصيرة جداً (15 إلى 120 ثانية) بحيث يمكن تخطّي الخادعات الناجمة عن الحركة.

وبالمقابل فإن هذه الأجهزة معدة جيداً للعمل، وتبدي مقدرات فاصلة عالية تتلاءم جيداً مع استكشاف الجمجمة التي يمكن التحكم في حركاتها.

5.2.12. مقاييس الكثافة المقطعية بحركة وحيدة

وتضم أجهزة الجيلين الثالث والرابع:

تكون حزمة الأشعة السينية الدائرة حول المريض مروحية الشكل. تتحقق قياسات أي موقع زاوي عندما تمسح جملة المنبع والكاشف المتضامنين مرّةً واحدة قوساً من دائرة بدورانها حول المريض.

يضيء المنبع، لدى استخدام حزمة مروحية عريضة، عدداً كبيراً من الكواشف في آن واحد، ويسمح بإجراء عدد من القياسات يماثل عدد الكواشف، فإذا كان متعدد الكواشف مكوناً من مئتي كاشف عنصري، ويجري قياساً واحداً في كل درجة، نحصل على $72000 = 360 \times 200$ قياس في دورة واحدة. وهذا هو الحل، الذي يسمح طبعاً بالحصول على مقاطع في مدد قصيرة من رتبة بضع ثوان.

والعيب الكبير لهذا الحل يكمن في ضرورة وجود استقرار تفاضلي بين الكواشف: إذ يمكن للخلل في كاشف معين، في هذا الجهاز أن يضر بجودة الصورة بسبب الخادعات الدائرية التي يولدها.

إن هذا الجهاز هو أكثرها تلاؤماً حالياً مع دراسة كامل الجسم؛ لأنه يحقق مقاطع في مدد أقصر من لحظة انقطاع النفس، مما يسمح في التحكم بالخادعات التي تنشأ عن الحركات التنفسية.

إن هذا الحل التقاني، وهو أكثرها انتشاراً حالياً، ويبدو أنه يحقق أفضل تسوية ممكنة بين مختلف التطبيقات المرغوب فيها. يذهب التطور الطبيعي لمثل هذا النموذج من الأجهزة، نحو تحقيق حركة مستمرة حول المريض لتسمح باستخدامها بمرونة وتواتر كبيرين.

تسمح هذه الأمور التقانية والعملية حول عمل واستخدام مقاييس الكثافة المقطعية بنفوذ الأشعة السينية بالإحاطة بكفايتها وعقبات استخدامها، ويبدو أنه لا يمكن لجهاز معين أن يبدي كفاية عالية في مجالات استخدامه كلّها في آن واحد.
ويبدو منطقياً على الصعيد التقليدي ابتكار أجهزة تقدم تسوية عملية بين مختلف الحاجات مع الاحتفاظ ببعض المرونة في استخدامها. إذ يجب توافر إمكانات في اختيار ثخانة المقطع وجرعة التشعيع.

يمكن للأجهزة الأخرى المستخدمة في مجال البحث أو في تطبيقات أكثر دقة أن تستفيد من التحسن المستمر في مجال معين.

5.2.13. دور الإلكترونيات المكروية في تطور مقاييس الكثافة المقطعية

يتكون مقياس الكثافة المقطعية المحوسب، أساسياً، من نظام تصوير بالأشعة السينية، يأخذ لقطات متتالية لمقطع من التشريحية، وتقوم وحدات الحساب المرافقة بمكاملة توابع تعرّف الصور التحليلية، وبتنفيذها، ومن ثم تقديم الإشارات اللازمة لبناء الصور والتي تعطى على شريط للصور، ثم تطبع عليه المعطيات المرافقة.

كانت مقاييس الكثافة المقطعية المحوسبة، التي يضم حاسبها المرافق مكونات تقليدية من دارات مدموجة، تستغرق من 6 إلى 8 دقائق في إجراء الصورة. وأما الجيل الثاني من هذه المقاييس فيعتمد كلمات مكونة من ثمانية أرقام ثنائية، كما يعتمد متعدد معالجات مكروية.

وقد انخفضت مدة توليد الصورة في هذا الجيل من المقاييس من 10-6 دقيقة إلى 20-5 ثانية، إضافة إلى انخفاض أبعادها وتكاليفها. يراوح عدد عناصر الصورة المقطعية التي يعطيها الماسح بين $(256)^2$ و $(512)^2$ عنصر صورة. ويعاد بناء المقطع فيها بدءاً من عدة مئات من زوايا الرؤية المختلفة لذلك المقطع، أضف إلى ذلك أن مقاييس الكثافة المقطعية لهذا الجيل تولّد صوراً في بعدين، وهي أبطأ من أن تتمكن من مواكبة حركة بعض الأعضاء كالقلب أو الرئتين في وضعين يبدوان متعاقبين. وفي هذا النظام يترتب على المريض أن يحبس نفسه لإظهار صورة مقطعية للرئتين، لكن ليس في مقدور هذه المقاييس

إظهار صورة مقطعية لقلب يخفق، مما دعا إلى ابتكار جيل جديد من وسائل إعادة بناء الصور أكثر فعالية من متعدد المعالجات المكروية المصمم للاستطبابات العامة، وسرعان ما تحقق الأمر، وأصبح بناء الصور ينفّذ بسرعة هائلة وفي الزمن الحقيقي، فكان مقياس مشفى مياو الذي يكرر مسح العضو بأكمله خلال فواصل زمنية تساوي 1/60 من الثانية، ويعيد بناءه في ثلاثة أبعاد على نحو ما تتكرر التغيرات الدينميكية للبنى المتحركة في الشكل والحجم. ولتحقيق ذلك النظام عمل على تطوير معالجات حسابية تعمل في الشروط المثلى لاستطباب خاص بحيث تنفذ خوارزميات إعادة البناء الموافقة. وأصبحت هذه الإمكانات حقيقة مع ظهور مكونات المعالج التي تعتمد على الدارات المدموجة على مقياس كبير Very Large Scale Integration (VLSI) والتي توافرت في الثمانينات وتميزت بإمكانات عالية للسرعة تفوق 1 مليون دورة، وإمكانات للذاكرة الثابتة Read Only Memory وللذاكرات غير الثابتة Random Access Memory (RAM) التي تتسع لمليون كلمة على الأقل، ويعبر عن كل كلمة فيها ب 64 رقماً ثنائياً مع إمكان إجراء 2 إلى 3 بلايين من العمليات الحسابية في الثانية وبمدد معالجة للصور من مرتبة 1 نانوثانية /عنصر صورة، وهذا ما يعطي الحاسب إمكانات معالجة ما تم مسحه خلال بضع ثوان.

وبتطور هذا النظام أمكن للباحثين في المجال الحيوي الطبي وللمستكشفين السريريين دراسة مزايا المسح الحجمي لكامل الأعضاء ودراسة مخططات تدفق الدم فيها في الزمن الحقيقي ومقارنتها بالنتائج التي تعطيها الأجهزة التي تنتج مقطعاً واحداً فقط خلال عدد كبير من الثواني. يمكن كذلك بعد التأكد من موثوقية هذا النظام وأهميته في تقدم طرائق التشخيص الطبي ومع اتساع مبتكرات الهندسة الإلكترونية الدقيقة أن تتنبأ بتطوير أنظمة أقل كلفة وأكثر توافراً في المشافي وفي المراكز الطبية، وتهدف إلى إجراء تشخيص عال للأمراض التي ما تزال غامضة حتى الآن.

الفصل السادس

الإشعاع الحراري (تحت الأحمر)
وإشعاع الجسم الأسود
Infrared Radiation & Blackbody Radiation

6.1. موقع الإشعاع تحت الأحمر في الطيف الكهرطيسي

يشكل الإشعاع تحت الأحمر جزءاً مهماً من طيف الإشعاعات الكهرطيسية يمتد من نحو 300 GHz إلى 400 THz (1 mm - 750 nm). ويمكن تقسيمه إلى ثلاثة أجزاء:

1. تحت الأحمر البعيد Far-infrared من 300 GHz إلى 30 THz (1mm - 10µm). يدعى الجزء المنخفض من هذا المجال أيضاً الأمواج المكروموجية أو أمواج التيراهرتز. يتم امتصاص هذا الإشعاع عادة بما يدعى الأنماط الدورانية في جزيئات الطور الغازي، وبالحركات الجزيئية في السوائل والفونونات المقابلة في الأجسام الصلبة. يمتص بخار الماء في الغلاف الجوي الأرضي بشدة هذا المجال، الأمر الذي يجعل الغلاف الجوي عاتماً عملياً بالنسبة له. غير أنّه يوجد بعض مجالات الأطوال الموجية (بعض النوافذ) في المجال العاتم تسمح بالنفوذ الجزئي، ويمكن استخدامها في علم الفلك. غالباً ما يطلق على مجال الأطوال الموجية من نحو 200 µm إلى بضعة ملمترات اسم "sub-millimeter" في الفلك، مما جعل المصطلح far infrared يقتصر على الأطوال الموجية التي تقل عن 200 µm.

2. تحت الأحمر المتوسط Mid-infrared من 30 إلى 120THz (10 – 2.5 µm) يمكن للأجسام الحارة (الأجسام السوداء الإشعاعية بين $20^{o}C$ و $100^{o}C$) أن تصدر الإشعاع بشدة في هذا المجال، ويصدر جلد الإنسان في درجات الحرارة العادية بشدة عند الطرف الأخفض من هذا المجال. يتم امتصاص هذا المجال من قبل الاهتزازات الجزيئية، إذْ تهتز الذرات المختلفة في الجزيء حول مواقع توازنها. يدعى هذا المجال أحياناً مجال البصمات، لأن طيف امتصاص تحت الأحمر المتوسط لمركب معين يخص ذلك المركب.

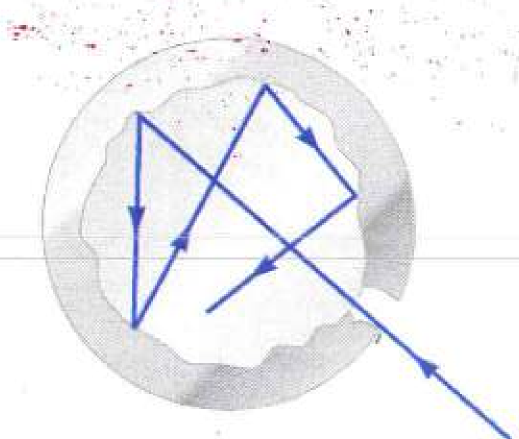
3. تحت الأحمر القريب Near-infrared من 120THz إلى 400 THz (2,500 - 750 nm). تشبه العمليات الفيزيائية المرتبطة بهذا المجال مثيلاتها في المجال المرئي. يمكن الكشف عن التواترات الأعلى في هذا المجال مباشرة ببعض أنواع أفلام التصوير الضوئي، وبأنواع متعددة من حساسات صور الحالة الصلبة للتصوير الضوئي تحت الأحمر وتصوير الفيديو.

تصدر الغازات والأجسام السائلة والصلبة، عندما تسخّن إلى بضعة آلاف الدرجات، إشعاعات كهرطيسية ناتجة عن الاهتزازات الحرارية لجزيئاتها. تتميز طيوف الإصدار عموماً بأنها مستمرة، ولو أنها تختلف من جسم إلى آخر، ذلك أن عدد الفوتونات التي يصدرها أي جسم أو يمتصها يرتبط بطبيعة ذلك الجسم وبعدد المستويات الطاقية فيه، كما تتغير طيوف الإصدار مع تغير درجة حرارة الجسم المصدر.

6.2. الجسم الأسود

يبدو الوسط الذي يتميز بالكثير من المستويات الطاقية المتقاربة فيما بينها، بحيث يمتص كل الفوتونات التي تسقط عليه أسود، لذا يطلق عليه اسم الجسم الأسود blackbody. ويصعب، عملياً، إن لم يكن مستحيلاً إعداد سطح ماص تماماً، ولو أنه يمكن تحسين الامتصاص بإعداد حجرة كما في الشكل 1-6.

حيث يمثل وجود ثقب صغير في جدار حجرة جسماً أسود أفضل مما هي عليه جدران تلك الحجرة. حيث ينعكس كل شعاع ضوئي يدخل الحجرة من خلال الثقب عدداً كبيراً من المرات قبل مغادرته لها، كما يمكن أن تمتصّه الجدرانُ عند كل انعكاس. فإذا كانت الجدران سوداء يبدو الثقب أكثر اسوداداً.



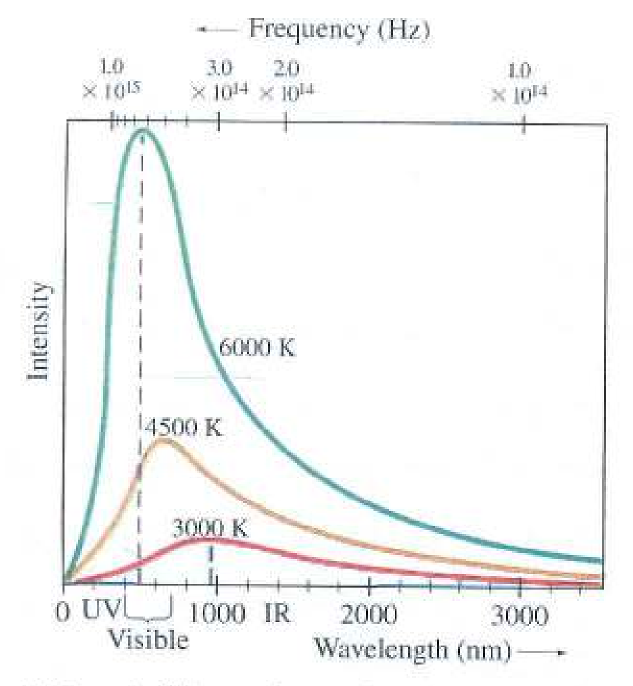
الشكل 6.1. نموذج فيزيائي لجسم أسود يتكون من فتحة في حجرة (تجويف).

فالفوتونات التي تعبر الثقب (الفتحة) في الحجرة ترتدّ عن الجدران مرات عديدة قبل أن تغادره، وبذلك يزداد احتمال امتصاصها. تدعى هذه الحجرة ذات الثقب الماص المثالي " الجسم الأسود " حتى لو لم تكن الجدران كذلك. وبالمقابل عندما يسخن الجسم الأسود، يكون طيف الإشعاع الصادر عنه مستمراً نظراً لتقارب مستويات الطاقة فيه. وعند تصوير حجرتين مختلفتين في درجتي حرارتيهما فإنه يبرهن على ارتباط مقدار الطاقة الصادرة من الحجرة بدرجة حرارة جدرانها وليس بطبيعة سطوحها. لذا فإن الماص المثالي هو مصدر مثالي في الوقت نفسه.

إذا لم يكن السطح ماصاً مثالياً، فإننا نعرّف " الإصدارية *emissivity*" $e(\lambda)$، التي تدل على جزء الإشعاع الممتص أو الصادر عند الطول الموجي λ. وعندما يعبر الإشعاع كله (دون نقصان) هذا السطح أو يرتد عنه فإن إصداريته تساوي الصفر وعندما يُمتصُّ كله فإن إصداريته تساوي الواحد من أجل كل الأطوال الموجية.

لشدة إشعاع الجسم الأسود (أي مقدار الطاقة الصادرة عن واحدة السطح من جسم أسود في واحدة الطول الموجي في واحدة الزمن) تابع عام يدعى "تابع توزع إشعاع الجسم الأسود" $W(\lambda, T)$ ووحدته $watt m^{-3}$ ولو أنه غالباً ما يعبر عنه بالواط في السنتمتر مربع لكل مكرومتر.

يبين الشكل6.2 تغير تابع الجسم الأسود $W(\lambda, T)$ بدلالة الطول الموجي في درجات حرارية مختلفة. وعندما يصبح السطح الأسود أو جدران الحجرة أكثر سخونة ينزاح الطيف نحو الأطوال الموجية الأقصر مما يتفق مع الجدول6.1.



الشكل 6.2. تابع إشعاع الجسم الأسود بدلالة كل من الطول الموجي والتواتر عند ثلاث درجات حرارة مختلفة.

تدل دراسة تغير تابع إشعاع الجسم الأسود في درجة قريبة من درجة حرارة الجسم الحي $(37^\circ C = 310^\circ K)$ على أن الطاقة التي يصدرها الجسم الأسود لا تتعلق إلا بدرجة حرارته المطلقة.

الجدول6.1

اللون	درجة الحرارة $T^\circ K$
النهار فقط	650 – 800
الأحمر الكرزي	579 – 1175
الأصفر	1200 – 1505
الأبيض	1425 – 1800
الأبيض الباهر (المزرق)	1900

ولأن هذا التابع لا يتعلق إلّا بدرجة الحرارة فإنه يمكن لفت الانتباه إلى الخاصتين الأساسيتين:

1. تتناسب الكثافة الإجمالية لتدفق الإشعاع (استطاعة واحدة السطح) التي يشعها جسم أسود طردياً مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة T (قانون استفان وبولتزمان):

$$W(Watt/m^2) = \sigma T^4 \qquad (6.1)$$

حيث $\sigma = 5.67\times10^{-8}\ Watt\, m^{-2} K^{-4}$ ثابت استفان وبولتزمان.

2. إن الاستطاعة الصادرة عن جسم أسود تابع متزايد لدرجة الحرارة، كما أن الطول الموجي الموافق للنهاية العظمى λ_{max} لهذا التابع ينزاح بارتفاع درجة الحرارة نحو الأطوال الموجية الأقصر، وفقاً لعلاقة فين Wien:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2.9 \times 10^{-3} m^{\circ}K \qquad (6.2)$$

تدل الدراسة على أن جسماً سطحه $1cm^2$ وفي درجة حرارة الوسط $300^{\circ}K$ مثلاً لا يصدر إلّا استطاعة قدرها $40\ mW$ ، وأن النهاية العظمى لتابع إشعاع هذا الجسم عند هذه الدرجة تقع عند الطول الموجي $\lambda = 9.6 \mu m$. وهذا يفسر وقوع المصدرات الحرارية في المجال تحت الأحمر.

يمكن تحقيق الأجسام السوداء مختبرياً باستخدام أجسام صلبة متوهجة محمولة إلى درجات حرارية مرتفعة نحو $(3000^{\circ}K)$ وبنياتها معقدة نوعاً ما: ومصباح سلك التنغستن هو مثال تقريبي (الشكل6.2). كما يمكن تشبيه شمسنا كذلك بجسم أسود، درجة حرارة سطحه تكافئ $5600^{\circ}K$. ويصدر ضوءاً أبيض يتمركز طيفه عند $550\,n\,m$ عند الإشعاع ذي اللون الأصفر + الأخضر ويغطي المجال المرئي كاملاً، وهو جزء الطيف الذي تبدي فيه عين الإنسان حساسيتها العظمى.

يضاف إلى ذلك أن التوزع المكاني لإشعاع الجسم الأسود متماثل المناحي، أي إنَّ كثافة تدفقه مستقلة عن اتجاه الإصدار، إذْ إنّ الزاوية الصلبة التي يغطيها التدفق هي كامل المكان الذي تبلغه.

يمكن إجراء محاكمات ترموديناميكية لبيان أنه إذا كان الجسم لا يمتص الضوء كله عند طول موجي معين أي إنّ إصداريته $e(\lambda)$ أصغر من الواحد ومِنْ ثَمَّ فإن كثافة الطاقة الصادرة عند ذلك الطول الموجي:

$$p(\lambda, T) = e(\lambda) \cdot W(\lambda, T) \qquad (6.3)$$

يطلق على الجسم الذي تكون إصداريته $e(\lambda)$ ، ثابتة ولكن أقل من الواحد اسم الجسم الرمادي gray body.

يسلك جسم الإنسان سلوك مفاعل حراري مستقل autonomic thermal reactor، مكون من النواة وتضم الصدر والبطن والجملة العصبية المركزية والعضلات ودرجة حرارتها ثابتة تقريباً، ومن الغلاف ويضم النسج المحيطية ولاسيّما الجلد ودرجة حرارته متغيرة.

تؤدي النواة دوراً مهماً في التنظيم الحراري، كما يعد المستقيم والبلعوم والأذن المواقع الرئيسية الثلاثة لقياس درجة حرارة النواة.

تتحرر الطاقة في هذا المفاعل نتيجة للتفاعلات الكيميائية المتعددة التي تجري على مستوى خلايا العضوية، ويستمر هذا المفاعل الحراري بالعمل عن طريق الغذاء والهضم.

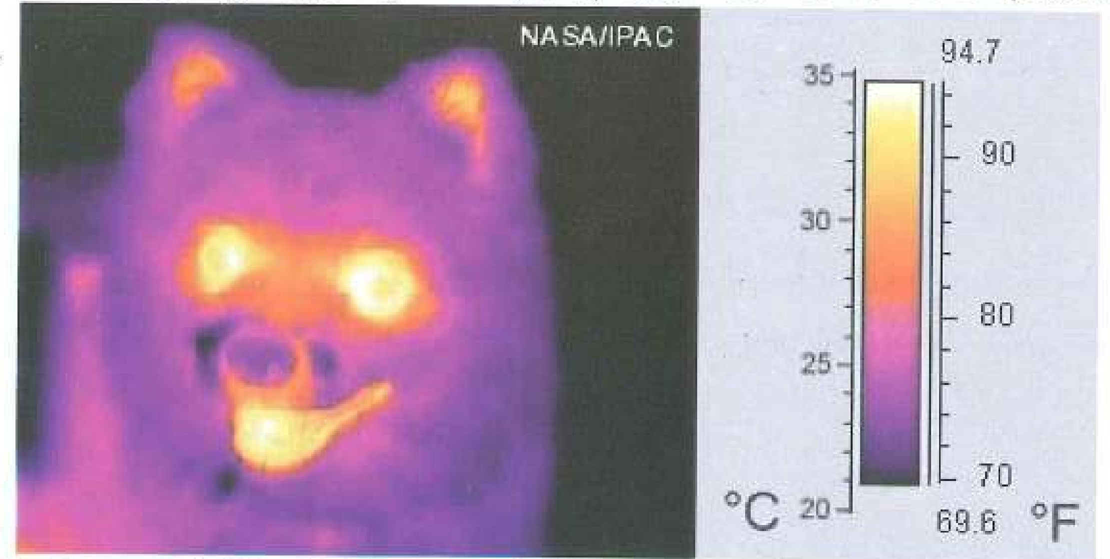
إن هذا المفاعل يعمل حتى في حالة الراحة مولّداً نحو مئة واط. ويمكن في حال تمرين شديد أن يولد نحو سبعمئة واط. حيث تنجم هذه الزيادة في الحرارة عن العضلات. وبقدر ما تكون الفاعلية الفيزيائية أكبر يكون استقلاب الخلايا أكبر وترتفع درجة الحرارة الداخلية.

إن هذا المفاعل الحراري لا يعرف العزل الحقيقي ولو أنه يحافظ على درجة الحرارة 37°C في الزمن الحقيقي. تحدث في الواقع تبادلات حرارية عديدة بين الإنسان ومحيطه، حيث يشكل الجلد مقرّ 90% من هذه التبادلات واكتساب الحرارة وفقدانها يجري بآليات أربع وهي:

6.3. آليات فقدان الحرارة

6.3.1. الإشعاع

الإشعاع هو انتقال الحرارة بالأمواج الكهرطيسية كالضوء المرئي والإشعاع تحت الأحمر وفوق البنفسجي. وما من امرئ إلاّ وشعر بدفء إشعاع الشمس وحرارة مواقد النار الشديدة. إن معظم الحرارة من هذه الأجسام الحارة لا يصلنا بالنقل conduction أو الحمل convection عن طريق الهواء، بل بالإشعاع radiation. يحدث هذا الانتقال للحرارة حتى لو لم يكن إلاّ الخلاء بينك وبين منبع الحرارة.



الشكل6.3. صورة للإشعاع تحت الأحمر الصادر من مختلف أجزاء الجسم بالألوان الاصطناعية. تكون شدة الإصدار أكبر ما يمكن (الأحمر) من المناطق ذات الحرارة الأعلى، ويكون الإصدار ضعيفاً من المناطق ذات درجة الحرارة الأخفض.

تصدر أجسامنا الطاقة حتى في درجات الحرارة العادية على شكل إشعاع كهرطيسي. ويكون معظم الطاقة، في درجات الحرارة العادية كالدرجة $20^{\circ}C$ في مجال الأشعة تحت الحمراء التي تزيد أطوالها الموجية على الأطوال الموجية للضوء المرئي (الشكل6.3).

يتناسب معدل إشعاع الطاقة طردياً مع مساحة السطح A. ويتزايد هذا المعدل بسرعة مع ارتفاع درجة الحرارة وفقاً للقوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة لسطح الجسم. يعتمد المعدل أيضاً على طبيعة السطح، من خلال الإصدارية. وهي عدد ليس له أبعاد تقع قيمته بين 0 و1، ويمثل نسبة معدل الإشعاع من سطح معين إلى معدل الإشعاع من مساحة مساوية من سطح مشع أسود مثالي في درجة الحرارة نفسها. تعتمد

الإصدارية أيضاً نوعاً ما على درجة الحرارة. ومِنْ ثَمَّ يمكن التعبير عن التيار الحراري $q = dQ/dt$ الناجم عن الإشعاع من مساحة سطح A إصداريته e بالشكل:

$$q = Ae\sigma T^4 \quad \text{التيار الحراري الإشعاعي} \qquad (6.4)$$

غالباً ما تكون الإصدارية e للسطوح العاتمة أكبر منها للسطوح الفاتحة. تقدر الإصدارية لسطح نحاسي ناعم بنحو 0.3. ولكن يمكن لإصدارية سطح أسود أن تكون قريبة من الواحد.

6.3.1.1. الإشعاع والامتصاص

بينما جسم في درجة الحرارة المطلقة T يشع، فإن الوسط المحيط به في الدرجة المطلقة T_s يصدر أيضاً الإشعاع الذي يمتص الجسم بعضاً منه. إذا كان الجسم في توازن حراري مع الوسط المحيط يكون $T = T_s$ ولا بد لمعدلي الإشعاع والامتصاص أن يكونا متساويين في هذه الحالة. وليكون هذا الأمر صحيحاً، يجب إعطاء معدل الامتصاص بالعلاقة $q = Ae\sigma T_s^4$. ومِنْ ثَمَّ يكون معدل الإشعاع الصافي لجسم في درجة الحرارة T ودرجة حرارة الوسط الذي يحيط به T_s:

$$q_{net} = Ae\sigma T^4 - Ae\sigma T_s^4 = Ae\sigma(T^4 - T_s^4) \qquad (6.5)$$

إن القيمة الموجبة لـ q_{net} تعني الحرارة الصافية التي تتدفق من الجسم. تدل المعادلة (6.5) على أن التيار الحراري بين جسمين في حالة الإشعاع يعتمد، كما في حالتي النقل والحمل (انظر الفقرتين 3.2.2،3) على الفارق بين درجتيهما وفق تلك العلاقة.

6.3.1.2. تطبيقات الإشعاع

إن انتقال الحرارة بالإشعاع مهم في بعض الأماكن غير المتوقعة. إذ يمكن للوليد الخديج في الحاضنة أن يبرد بشكل كبير بالإشعاع إذا كانت جدران الحاضنة باردة حتى لو كان الهواء في الحاضنة دافئاً. تنظم بعض الحاضنات درجة حرارة هواء الحاضنة بقياس درجة حرارة جلد الوليد.

يشع جسم الإنسان في مجال الأشعة تحت الحمراء بشكل قريب جداً من إشعاع الجسم الأسود. وإن القياسات التي جرت على إصدارية جسم الإنسان في المجال $1\ \mu m \le \lambda \le 14\ \mu m$ دلت على أنها تساوي $e(\lambda) = 0.98 \pm 0.01$ وذلك في حالات كل من البشرة البيضاء والسمراء والسوداء والمحروقة على السواء.

وفي حالة جسم إنسان راشد، تقدر مساحة سطحه بنحو $1.73 m^2$، ودرجة حرارة جلده $33^\circ C = 306^\circ K$ (وهي أقل من درجة حرارة قلب الجسم التي تقدر بنحو $310^\circ K$) فإننا نحصل بتطبيق المعادلة (6.1) على الطاقة الكلية التي يصدرها في واحدة الزمن:

$$W_{tot} = AW_{tot} = A\sigma T^4$$

$$=\left(1.73m^2\right)\left(5.67\times10^{-8}Wm^{-2}K^{-4}\right)\left(306\right)K^4$$

$$=875\text{Watt}$$

إن هذه الطاقة أكبر بنحو تسع مرات من المعدل الأساسي لطاقة الاستقلاب الخلوي في الجسم الحي الذي يقدر بنحو 100 Watt. يعود السبب في هذه الزيادة إلى افتراض أن الوسط المحيط بالجسم في درجة الصفر المطلق، لدى إجراء الحساب، أو أن الجسم يشع في الفضاء الخالي، غير أنه عندما تحيط به سطوح مجاورة له في درجة حرارة معينة ولتكن T_s، فإن إشعاعاتها تصل إليه، وتكون محصلة إشعاعه أقل من 900 Watt بكثير.

إن أبسط ترتيب يُحسب فقدان الحرارة من أجله، يكون بإحاطة الجسم الأسود ذي الدرجة T بجسم آخر درجته T_s.

وعندما يتحقق التوازن يصبح الجسمان في درجة الحرارة نفسها $T=T_s$ والطاقة الصادرة عن الجسم تساوي الطاقة التي يمتصها، وارتفاع T يؤدي إلى زيادة الاستطاعة الصادرة وفقاً للعلاقة $W=\sigma T^4$. فيصدر الجسم حينئذٍ من الاستطاعة أكثر مما يمتص، ويعود التوازن عندما يبرد الجسم أو عندما تسخن الجدران بحيث يصبح $T=T_s$ مجدداً.

يمكن القيام بمحاكمات ترموديناميكية تدل على أن محصلة الاستطاعة التي يصدرها الجسم تساوي:

$$W_{tot}=A\sigma\left(T^4-T_s^4\right)$$

فإذا لم يكن الجسم أسود، أو لم تكن درجة حرارة جدرانه متجانسة، يصبح حساب الاستطاعة التي يفقدها أكثر تعقيداً، ولو أن إجراءه تبعاً لهذه المعادلة أفضل بكثير منه في حالة المعادلة السابقة. لنفترض أن درجة حرارة الوسط الذي يحيط بجسم الإنسان $T_s=293^\circ K\ \left(20\ ^\circ C\right)$، تصبح محصلة استطاعته الإشعاعية في هذه الحالة:

$$W_{tot}=\left(1.73\right)\left(5.67\times10^{-8}\right)\left(306^4-293^4\right)$$

$$=137\ Watt$$

هذا يعني أن الجسم العاري الذي تحيط به جدران في الدرجة $20^\circ C$ يعمل ليحافظ على ثبات درجة حرارته، حتى لو كانت درجة حرارة الهواء الذي يحيط به عالية إلى حد ينعدم معه فقدان الحرارة بالنقل والحمل.

إذا كنت تعيش في منطقة يسود فيها مناخ شمالي، يمكن أن تشعر بالبرد ليلاً في غرفة ستائرها مرفوعة (حتى لو كانت النوافذ مغلقة) وحتى لو كان المنظم الحراري (الترموستات) يشير إلى درجة حرارة كافية. يرجع هذا الأمر إلى الإشعاع الصادر عنك نحو النافذة، وزجاج النافذة الشفاف في المجال المرئي

ليس كذلك بالنسبة للأشعة تحت الحمراء، فهو عاتم في هذا المجال وإصداريته عالية إلّا أن إشعاعه نحوك أقل بكثير من إشعاعك نحوه فتشعر بالبرد.

يحدث الأمر نفسه لدى الطفل الخديج في الحاضنة، فإذا وضعت هذه الأخيرة قرب إحدى النوافذ تفقد جدرانها الحرارة بالإشعاع نحو النافذة، كما يمكن للوليد أن يبرد بالإشعاع نحو جدار الحاضنة حتى ولو أن ميزان الحرارة في الحاضنة يشير إلى درجة معقولة من الحرارة.

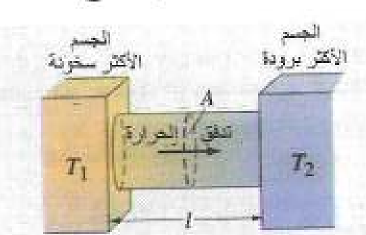
ولهذا يجب الانتباه إلى المكان الذي توضع فيه الحاضنة كما يجب عزل جدرانها، أو يجب تصميم حاضنات تقاس فيها درجة حرارة قلب الوليد (أمعاؤه) وتستخدم لضبط درجة حرارة الهواء.

6.3.2. النقل

النقل *Conduction* ظاهرة تنتقل فيها الحرارة في داخل وسط معين (صُلْب أوسائل أو غازي) من منطقة عالية درجة الحرارة نحو أخرى منخفضة درجة الحرارة، أو بين أوساط مختلفة يلامس بعضُها بعضَها الآخر. تنتشر الحرارة في هذه الآلية بالتماس المباشر بين الجزيئات من دون أن يطرأ انتقال ملحوظ على هذه الجزيئات. وطبقاً للنظرية الحركية تتناسب درجة حرارة عنصر صغير من المادة طردياً مع الطاقة الحركية للجزيئات التي يتكون منها. تدعى الطاقة المتراكمة في عنصر معين من المادة "الطاقة الداخلية" للعنصر وتتحكم فيها سرعة الجزيئات ومواقعها النسبية. وهكذا فبقدر ما تكتسب الجزيئات في منطقة معينة طاقة حركية وسطية أكبر منها للجزيئات في منطقة مجاورة، وهذا ما يتجلى بفارق في درجة الحرارة، فإن الجزيئات التي تملك الطاقة الأعلى تنقل للجزيئات في المنطقة ذات درجة الحرارة الأخفض جزءاً من طاقتها. وانتقال الطاقة هنا يمكن أن يجري بالتماس المرن (كما هو الحال في الموائع مثلاً) أو بانتشار الإلكترونات من منطقة عالية درجة الحرارة نحو منطقة منخفضة درجة الحرارة (كما هو الحال في المعادن). يستمر هذا الانتقال الحراري حتى يتحقق التوازن.

إن النقل هو الآلية الوحيدة التي تنتقل الحرارة عن طريقها في الجسم الصلب. وهو مهم أيضاً في الموائع، ولكنه يترافق في هذه الحالة بانتقال الحرارة بالحمل وفي بعض الحالات بالإشعاع.

تربط العلاقة الأساسية لانتقال الحرارة بالنقل بين تدفق الحرارة q_k بالنقل من جهة وجداء الناقلية الحرارية للمادة k وسطح المقطع A الذي تنتقل عبره الحرارة بالنقل (يتعامد مع اتجاه تدفق الحرارة) والتدرج الحراري في المقطع dT/dx أي النسبة بين تغير



الشكل6.4. آلية النقل الحراري بين منبعين حراريين: منبع حار والآخر بارد يصل بينهما ناقل حراري.

درجة الحرارة والمسافة التي يعبرها التدفق الحراري. ولكتابة معادلة الانتقال الحراري بالنقل، نعتبر أن اتجاه تزايد x هو الاتجاه الموجب لانتقال الحرارة. يتطلب المبدأ الثاني في الترموديناميك أن تنتقل الحرارة من النقاط الأكثر سخونة نحو النقاط الأبرد، ولهذا يكون التدفق موجباً عندما يكون التدرج الحراري سالباً ومِنْ ثَمَّ تكتب المعادلة الأساسية للنقل وفق بعد واحد في النظام المستقر (الشكل6.4):

$$q_k = -kA\frac{dT}{dx} \text{، حيث واحدات: } q_k(J/s) \text{ و } k\left(\frac{J/s\cdot m^2}{^\circ C/m}\right) = J/s\cdot m\cdot^\circ C$$

تدعى المواد ذات الناقلية الحرارية العالية " النواقل " في حين تدعى المواد ذات الناقلية الحرارية المنخفضة " العوازل". إذا كان k مستقلاً عن T فإننا نحصل بعد تكامل العلاقة السابقة على علاقة التدفق الحراري بالنقل بين سطحين في وسط معين البعد بينهما L، ودرجتا حرارتيهما T_{hot} و T_{cold}:

$$q_k = \frac{Ak}{l}(T_{hot} - T_{cold}) = \frac{\Delta T}{l/Ak}$$

يمثل ΔT في هذه المعادلة الكمون الحراري الذي يتحكم في انتقال الحرارة. أما l/Ak فيمثل المقاومة الحرارية R_K التي يبديها هذا الوسط بين السطحين الافتراضيين ويطلق على مقلوب المقاومة الحرارية اسم الناقلية الحرارية. وقد وجد أن الناقلية الحرارية للنسج المحيطية من مرتبة $5.0\times10^{-4}\ Ca/cm\sec^\circ C$.

يرتبط التبادل الحراري بالنقل بين جسم الإنسان ووسط صلب بوضعية الجسم وبفعاليته، ففي وضعية الوقوف لا يكون على تماس مع الأرض إلّا أخمص قدميه، مما يجعل فقدان الحرارة بالنقل مهملاً، يتزايد هذا النوع من التبادل في حالة الجلوس أو لدى النوم. ففي الجو البارد يجب تقليل سطح التماس مع الأرض الباردة إلى أقل ما يمكن أو استخدام حوامل قليلة النقل للحرارة. إذ يمكن أن يؤدي ارتفاع الناقلية الحرارية إلى تجمد فوري وخطير.

6.3.3. الحمل

إن التبادلات بالحمل Convection تجري بين الجسم الصلب والمائع المتحرك الذي يختلف عنه في درجة الحرارة. وفي معظم الحالات، تحدث التبادلات بالنقل وبالحمل في آن واحد، وتنخفض التبادلات بالنقل عندما تزداد سرعة المائع. في الأجسام الصلبة يمثل النقل النمط الوحيد لانتقال الحرارة، وينتقي الحمل الطبيعي أو التلقائي والحمل القسري. يكون الحمل تلقائياً في مائع معين عندما تنجم حركته حصراً عن تغيرات كثافته المرتبطة بتسخينه أو بتبريده (المائع الساخن يصعد)، وعلى العكس يكون الحمل قسرياً في المائع عندما يحرّك بسبب خارجي كالرياح أو حركات السباحة مثلاً. ترتبط التبادلات الحرارية بالحمل بين الجسم والمائع (كالهواء مثلاً) بنوع الحمل وبسطح الجسم وبسرعة الرياح وبالخصائص الفيزيائية للمائع وبنوع الجريان (صفائحي أم مضطرب). وأخيراً بفارق درجة الحرارة بين الجلد والمائع؛ وإن فقدان

الحرارة بالحمل في الماء أعلى منها في الهواء بنحو 25 مرة. تعد الرئتان كذلك مقر تبادلات حرارية بالحمل (بين النسيج الرئوي والهواء المستنشق).

يمكن كتابة تدفق الحرارة بالحمل بين سطح صلب ومائع على الشكل:

$$q_c = h_c A \ \Delta T \ (Watt)$$

حيث: q_c تدفق الحرارة بالحمل J/s و ΔT الفارق بين درجة حرارة السطح T_s ودرجة حرارة المائع و A السطح الذي يجري عبره انتقال الحرارة و h_c معامل انتقال الحرارة بالحمل $J/s \cdot m^2 \cdot {}^\circ C$. وهو ترتبط بالشكل الهندسي للسطح وبسرعة المائع وبخصائصه الفيزيائية، وغالباً بفارق درجتي الحرارة بينهما. وبالاعتماد على العلاقة الأخيرة يمكن تعريف الناقلية الحرارية K_c بالحمل وفقاً للعلاقة $K_c = h_c A$. وأما المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة بالحمل فتساوي مقلوب الناقلية $R_c = \dfrac{1}{h_c A}$

6.3.4. التبخر

إن التبخر *Evaporation* هي الطريقة الوحيدة المجدية للمحافظة على درجة حرارة الجسم الداخلية $37^\circ C$، في الصيف ولدى القيام بجهد فيزيائي كبير. فهو يسمح بتجنب زيادة تسخين العضوية. ويستطيع الإنسان بفضل ملايين الغدد العرقية أن يفرّغ نحو $500\,Watt$.

إن العضوية تقوّم فاعليتها الاستقلابية بشكل أفضل بالحرارة التي تكسبها وتخسرها. ويهدف هذا التنظيم الحراري لجسم الإنسان إلى جعله مستقلاً عن الشروط الحرارية المحيطة به. إذْ إنّ الاستقلال الحراري هو أمر شائع في بعض أعضاء " النواة " كالقلب أو الدماغ أو الكبد التي لا تسمح بتباعد حراري يتجاوز الدرجة المئوية الواحدة، لاختلال فاعليات الخلايا الإنزيمية والكهربائية خارج هذا المجال. وبالعكس تقبل العضلات وغلاف المفاعل (النسج المحيطية في الجسم) تفاوتات حرارية أكبر بكثير.

يتناول التنظيم الحراري التغيرات الحرارية لنواة المفاعل بشكل رئيسي. وبحسب المعلومات التي تكشف عنها المستقبلات الحرارية تقوم الغدة النخامية (تحت المهادية) *hypothalamus* مقرّ الجملة العصبية الخاملة بإطلاق أمر المحافظة على درجة الحرارة أو تحرير الحرارة.

تجري آليات الصراع التلاؤمي بين الجسم والوسط المحيط عن طريق الأوعية الدموية التي تتوسّع أقطارها أو تتضيق، كما تسعى العضوية في الصيف مثلاً لتكديس الحرارة كثيراً. ولتجنب ارتفاع الحرارة الداخلية تتمدد الأوعية الدموية فيزداد جريان الدم، وتنتشر الحرارة الداخلية نحو الخارج. وهذا يترجم بارتفاع درجة حرارة الجلد قليلاً، فيكتسب مظهراً مائلاً قليلاً إلى الحمرة. أما في الشروط الباردة فتتقلص الأوعية لتحد من انتشار الحرارة من العضوية.

تستمر عملية التلاؤم، وترسل الغدة النخامية إشارات في الصيف نحو الغدد العرقية فتسمح بالتبخير ومِنْ ثَمَّ فقدان الحرارة. وفي الشتاء تطلق الوسائط العصبية كالكاتيكولامين الرعشة وهي المنتج الكبير للحرارة في العضوية.

6.4. التصوير الحراري

التصوير الحراري بالإشعاع تحت الأحمر Infrared Thermography (IRT) والتصوير الحراري Thermal Imaging والفيديو الحراري ليست إلّا أمثلة عن علوم التصوير الحراري، يمكن الكشف عن الإشعاع تحت الأحمر الصادر عن الجسم لقياس درجة حرارة سطحه، إذْ تربط علاقة فين بين درجة حرارة الجسم والطول الموجي الذي يوافق النهاية العظمى لتابع إشعاع الجسم.

الشكل6.5. مريضة مصابة بالسرطان في الثدي الأيمن. لاحظ موقع درجة الحرارة العظمى.

$$T = 0.29\, cm^{\circ}K \,/\, \lambda_{\max}$$

هذا وإن التغيرات في درجة حرارة السطح تعكس الاختلافات في تدفق الدم في النسج تحت الجلد وتحمل معلومات تشخيصية.

وقد لاحظ الجراح لاوسُن Lawson أوّلَ مرة في عام1956 وجود شذوذ في حرارة سطح ورم في الثدي نتيجة لزيادة معّدل الاستقلاب فيه؛ ومن هنا نشأت الأهمية الحالية للتصوير الحراري الطبي. فدرجات الحرارة النموذجية لأورام الثدي $36.5^{\circ}C$ (الشكل6.5) وفي شريان الصدر الوحشي $34^{\circ}C$ وفي الشريان الثديي الأنسي $32^{\circ}C$ وفي الوريد السطحي $35^{\circ}C$.

وقد دلت دراسة استكشافية قام بها مشفى ليليانفيلد Lillienfield عام 1969 على 3518 مريضة، تضمنت مقارنة بين الفحص الفيزيائي للثدي والتصوير بالأشعة السينية والتصوير الحراري، على تقارب التقانات الثلاث في حساسيتها الإجمالية ودقتها.

ومن الاستخدامات التجريبية الأخرى للتصوير الحراري تحديد موقع الحبل السري والكشف عن الخثرات الوريدية وتحديد مواقعها والكشف عن الشريان السباتي أحادي الجانب. يبين الشكل6.6 مخططاً حرارياً ليدي شخص سليم بعد تدخين سيكارة. يدل السلم الحراري المرافق على تزايد البرودة من الأسفل (الأحمر) نحو الأعلى(الأزرق). تدل زرقة اليدين في المخطط مقارنة بالساعد على انخفاض درجة حرارتهما، بسبب

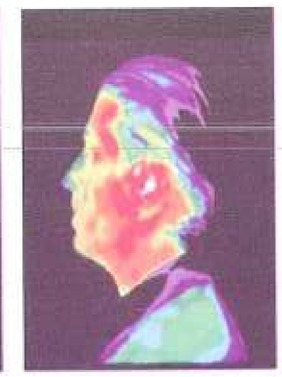
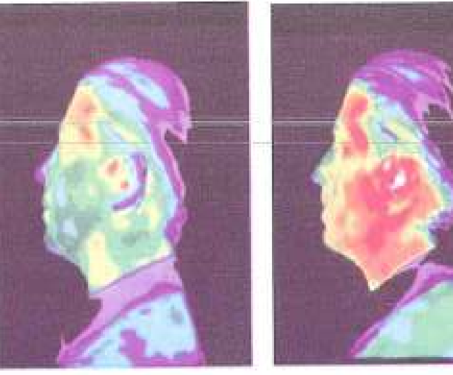
ضعف جريان الدم الذي يرافق التدخين. تجد في الشكل 6.7 صورة حرارية لدماغ شخص قبل وبعد الحديث بالهاتف النقال مدة 15 دقيقة تظهر ارتفاع درجة الحرارة الذي تحدثه أمواج الهاتف في الدماغ.



الشكل6.6. مخطط حراري ليدي شخص سليم بعد تدخين سيكارة يظهر فيها انخفاض درجة الحرارة بسبب ضعف جريان الدم الذي يرافق التدخين.

6.4.1. الأدوات المستخدمة في التصوير الحراري

تكشف المصوِّرات الحرارية الإشعاع في مجال تحت الأحمر من طيف الإشعاعات الكهرطيسية (نحو 9,000–14,000 nm أو 9–14 µm) وتولد صوراً لذلك الإشعاع تدعى المخططات الحرارية Thermograms. ولما كانت جميع الأجسام تصدر فوق درجة الصفر المطلق الإشعاع تحت الأحمر وفقاً لقانون إشعاع الجسم الأسود، فإن التصوير الحراري يجعل المرء قادراً على رؤية بيئته بوجود إنارة مرئية أو من دونها. إن مقدار الإشعاع الذي يصدره جسم معين يزداد مع ارتفاع درجة الحرارة؛ ومِنْ ثَمَّ يسمح التصوير الحراري للمرء برؤية التغيرات في درجة الحرارة. عندما ترى الأجسام الحارة من خلال مصوِّرة حرارية فإنها تبرز بوضوح مقابل الخلفيات الأكثر برودة. يصبح البشر والحيوانات ذات الدم الحار الأخرى مرئية بسهولة في بيئتها المحيطة، نهاراً أو ليلاً. ومِنْ ثَمَّ يفيد التصوير الحراري القوات المسلحة ومستخدمين آخرين لمصوِّرات المراقبة.

لشكل6.7. إلى اليسار صورة حرارية طبيعية، إلى اليمين صورة حرارية للشخص نفسه بعد أن تحدث مدّة خمس عشرة دقيقة باستخدام الهاتف النقال

للتصوير الحراري تاريخ طويل ولو أن استخدامه تزايد بشكل كبير مع التطبيقات التجارية والصناعية للخمسين عاماً الماضية. فعمال المطافئ يستخدمون التصوير الحراري للرؤية من خلال الدخان، لإيجاد الأفراد ولتحديد مقر نار مشتعلة.

تستخدم المصوِّرات الحرارية المتخصصة (الشكل6.8) صفائف مستوية البؤرة focal plane arrays (FPAs) تستجيب للأطوال الموجية الأطول (تحت الأحمر متوسط الطول الموجي وطويل الطول الموجي). من أكثرها شيوعاً أنتيمونيد الإنديوم وزرنيخيد الإنديوم والغاليوم وتلوريد الزئبق والكادميوم



الشكل6.8. مصوّرة حرارية وشاشة في وحدة مراقبة في مطار في اليونان. يمكن للتصوير الحراري أن يكشف عن الحمى أحد أعراض أنفلونز الطيور.

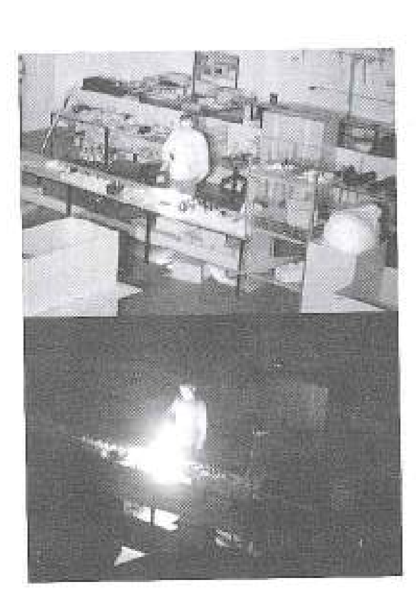
تعتمد مصوّرات الرؤية الليلية على المجال القريب من الإشعاع تحت الأحمر، المجاور للطيف المرئي مباشرة، كما يمكن أن ترى تحت الأحمر القريب الصادر أو المنعكس في الظلام التام بالنسبة للمجال المرئي. غير إن هذه الأدوات لا تستخدم عادة في التصوير الحراري؛ لأنها تتطلب ارتفاع درجة حرارة المشهد، ولكنها تستخدم مع منابع تحت الأحمر القريب الفعالة.

6.4.2. مقارنة بين التصوير الحراري الخامل والتصوير الحراري الفعال

جميع الأجسام في درجة من الحرارة فوق الصفر المطلق تصدر إشعاعاً تحت أحمر. ومن ثم يعد استخدام أداة الرؤية بالإشعاع تحت الأحمر طريقة ممتازة لقياس التغيرات الحرارية، وهي عادة مصوّرة للإشعاع تحت الأحمر مكونة من صفيف مستوي البؤرة focal plane array (FPA) infrared camera، يمكنها الكشف عن الإشعاع في مجالي تحت الأحمر المتوسط (3 to 5 μm) والبعيد (7 to 14 μm) ويدعيان MWIR و LWIR وهما يقابلان النافذتين عاليتي النفوذية للأشعة تحت الحمراء. وإن التغيرات غير النظامية لدرجة الحرارة على سطح جسم دليل على مشكلة محتملة.

6.4.2.1. في التصوير الحراري الخامل (الشكل6.9 الصورة في الأسفل)، تكون ملامح المشهد المعني عادة في درجة حرارة أعلى أو أخفض من درجة حرارة الخلفية. للتصوير الحراري الخامل الكثير من التطبيقات، كمراقبة الأفراد في مشهد وفي التشخيص الطبي (ولاسيّما في علم الحرارة Thermology).

6.4.2.2. التصوير الفعال



الشكل6.9. نتائج التصوير بإشعاع تحت أحمر فعال (الأعلى) ومن دونه (الأسفل)

يحتاج الأمر في التصوير الحراري الفعال Active Thermography إلى منبع للطاقة لتوليد التباين الحراري بين السمة المعنية والخلفية (الشكل6.9 الصورة في الأعلى). والطريقة الفعالة ضرورية في كثير من الحالات، على أن تكون الأجزاء المدروسة في توازن مع الوسط المحيط.

تجمع الإضاءة الفعالة بين تقانة تعزيز التصوير مع منبع إضاءة فعال يقع في مجال تحت الأحمر القريب near infrared (NIR) أو تحت الأحمر قصير الموجة(SWIR) shortwave infrared. تتضمن الأمثلة على هذه التقانات مصوِّرات الضوء المنخفض. تجمع الرؤية الليلية بين الإشعاع تحت الأحمر الفعال الإضاءة بإشعاع تحت أحمر مجاله الطيفي 700–1,000 nm، الذي يقع يقع مباشرة تحت المجال الذي تدركه العين، و مصوِّرات CCD الحساسة لهذا الضوء.

إن المشهد الناتج المظلم ظاهرياً بالنسبة لمراقب بشري، يبدو أنه صورة أحادية اللون على أداة عرض عادية . ولأن نظم الرؤية الليلية بالأشعة تحت الحمراء الفعالة يمكن أن تتضمن أدوات إضاءة تولد مستويات عالية من الضوء تحت الأحمر، فإن الصور الناتجة تكون مقدرتها الفاصلة أعلى منها في حالة تقانات الرؤية الليلية الأخرى. غالباً ما توجد الرؤية الليلية بالأشعة تحت الحمراء الفعالة في التطبيقات التجارية والمنزلية وأمن الدولة، حيث تجعل التصوير في أوقات الليل ممكناً في شروط الإضاءة المنخفضة. غير أنّه – نظراً لأنه يمكن الكشف عن الضوء تحت الأحمر بنظارات الرؤية الليلية– يحتمل الانسحاب من الموقع في العمليات الحربية التكتيكية.

6.4.3. التصوير الحراري الرقمي بالأشعة تحت الحمراء

التصوير الحراري الرقمي بالأشعة تحت الحمراء Digital Infrared Thermographic Imaging (DITI) إجراء تشخيصي مساعد مأمون خال من الألم وغير هجومي تستخدم فيه مصوِّرة للإشعاع تحت الأحمر المتوسط لتسجيل النماذج الحرارية وتغيرات درجة الحرارة على سطح الجسم مولدة صوراً رقمية في الزمن الحقيقي (مخططات حرارية) تكشف عن الخلل الوظيفي أو النمو غير الطبيعي للنسج، أو كليهما، نظراً لعدم ظهور الأعصاب والتغيرات الوعائية بالأشعة السينية أو الـMRI.

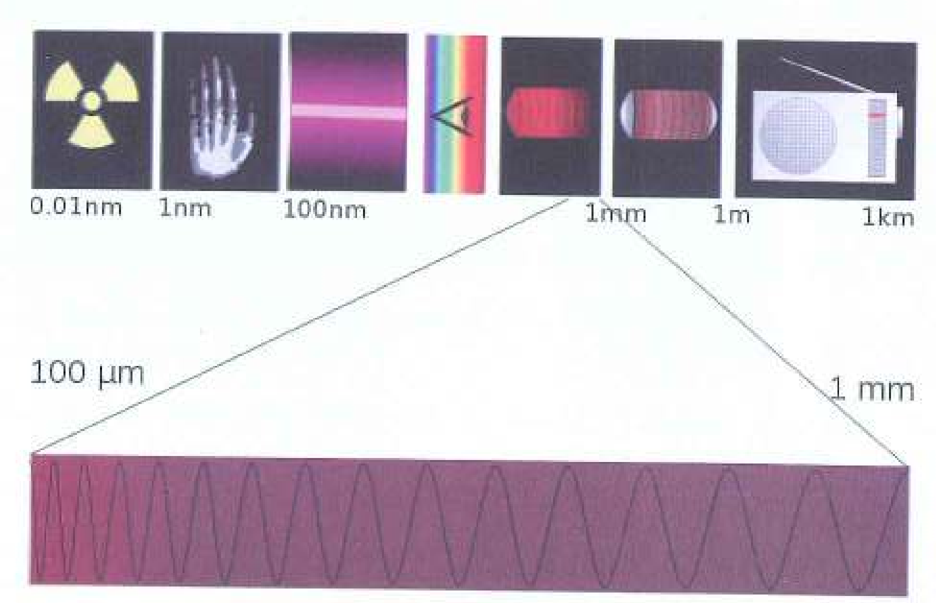
الفصل السابع

أمواج التيراهرتز أو أشعة التيراهرتز

Teraherz Radiation

7.1. مقدمة

إشعاع التيراهرتز هو مجال من طيف الإشعاعات الكهرطيسية يقع بين تحت الأحمر البعيد والأمواج المكروية 300GHz و10THz (الشكل7.1). وقد كانت دراسة هذا المجال حتى عهدٍ قريبٍ نادرة، بسبب صعوبة توليدها، ولم يكن يوجد إلّا بضعة منابع للطاقة المكروموجية عند الطرف العالي من المجال (الأمواج بأطوال موجية من مرتبة أجزاء من الملمتر أو ما يدعى أمواج التيراهرتز). ولكن أمكن الآن توليدها باستطاعات عالية، وتظهر حالياً تطبيقات لها في التصوير والاتصالات، كما يبحث العلماء في إمكانية استخدام تقانة التيراهرتز في بعض المجالات العسكرية، إذْ يمكن توجيه الأمواج العالية التواتر منها نحو جيوش العدو لتعطيل معداتها الإلكترونية.



الشكل7.1. تقع أمواج التيراهرتز عند مجال تحت الأحمر البعيد، قبيل بدء الأمواج المكروية، تضم مجال التواتر الواقع بين 300GHz و10THz في طيف الإشعاعات الكهرطيسية. وهو يغطي الأطوال الموجية من بضعة ملمترات إلى بضع عشرات المكرومترات.

يشغل إشعاع التيراهرتز موقعاً متوسطاً بين الأمواج المكروية وأمواج الضوء تحت الأحمر الذي يعرف بفجوة التيراهرتز، إذْ ما تزال تقانة توليدها وتداولها في المهد. وهي تمثل مجالاً في الطيف الكهرطيسي يصبح معه تواتر الإشعاع الكهرطيسي أعلى بكثير من إمكان قياسه رقمياً بالعدادات الإلكترونية التقليدية،

ومِنْ ثَمّ لا بد من طريقة بديلة لقياسها باستخدام خاصتي الطول الموجي والطاقة. وبالمثل لم يعد ممكناً توليد الإشارات الكهرطيسية وتوليفها في هذا المجال من التواتر بالأدوات الإلكترونية التقليدية المستخدمة في توليد الأمواج الراديوية والمكروية، الأمر الذي يتطلب ابتكار تقنيات وأدوات جديدة.

يقيم مجال التيراهرتز جسراً بين التواترات التي تنشأ من التقنيات الإلكترونية والتواترات التي تنشأ من التقنيات الضوئية. ولم يكن يتطرق لها في الماضي إلاّ علماء الفلك وفيزيائيو الإشعاع تحت الأحمر البعيد. أما الآن فيجري قضم المنطقة العصيّة على الدخول شيئاً فشيئاً من جهتي الطيف بفضل تقدم المكونات الإلكترونية والمنابع أو الكواشف الضوئية.

إن تطور الليزرات النبضية الفائقة القصر وتكنولوجيا أنصاف النواقل جعل ابتكار نوع جديد من المنابع ذات الإشعاع المترابط ممكناً، بالاعتماد على الخصائص الكمومية للأجسام الصلبة نصف الناقلة. ويعتبر ليزر الشلال الكمومي من أهم منابع التيراهرتز.

يقع إشعاع التيراهرتز كما ذكرنا بين الإشعاع تحت الأحمر والإشعاع المكروموجي في طيف الإشعاعات الكهرطيسية، فهو يشترك ببعض الخصائص مع كل منها. فهو إشعاع غير مؤين. يمكن لإشعاع التيراهرتز، مثله في ذلك كمثل الإشعاع المكروموجي، أن يخترق تشكيلة كبيرة من المواد غير الناقلة.إذ يمكن لإشعاع التيراهرتز أن ينفذ من خلال القماش والورق والكرتون والخشب ومواد البناء والبلاستيك والسراميك.غير أنّ عمق الاختراق عادة أقل منه في حالة الإشعاع المكروموجي. يتميز إشعاع التيراهرتز بعمق محدود في الضباب والغيوم، ولا يمكن أن يخترق الماء السائل أو المعدن.

يعد الغلاف الجوي ماصاً شديداً لإشعاع التيراهرتز في عصابات امتصاص نوعية لبخار الماء، ومِنْ ثَمّ فإن مدى التيراهرتز محدود إلى درجة تؤثر في فائدته في الاتصالات البعيدة المدى. غير أنّ هذا القيد، ربما ما يزال يسمح، على أبعاد من مرتبة 10 meters~، بتطبيقات مفيدة كثيرة في التصوير وغيره.

لقد تم استغلال كل مجالات طيف الإشعاعات الكهرطيسية: المرئي والأمواج المكروية والأشعة تحت الحمراء والأشعة السينية وأشعة غاما ... إلخ في الحصول على صور لأجسام ثابتة أو لأعضاء كائنات حية. غير أن أمواج التيراهرتز التي تدعى أحياناً الأمواج T، ذات فوائد مكملة لتلك الإشعاعات بحيث يمكن الكشف عن خصائص الأجسام على كامل الطيف الكهرطيسي. وقد أصبح استخدام أمواج التيراهرتز حقيقة ليس في مخابر البحث فحسب، بل في العالم الصناعي أيضاً. كما تفتح هذه الأمواج

آفاقاً في مجال الطب ولا سيما في الكشف عن النخور السنية غير المرئية أو في تشخيص الإصابة بالسرطان في مرحلة مبكرة وتحديد موقعها.

7.2. منابع إشعاع التيراهرتز

7.2.1. المنابع الطبيعية

يصدر إشعاع التيراهرتز كجزء من إشعاع الجسم الأسود في درجات من الحرارة أعلى من 10 K. فهو يصدر من الجمادات ومن الكائنات الحية، ومصدره الحركات الاهتزازية والدورانية للجزيئات التي تتكون منها المادة أو النسج ، غير أن الاستطاعة ضعيفة في هذا المجال.

7.2.2. المنابع الاصطناعية

منابع التيراهرتز الاصطناعية عديدة ولكن ليزر الشلال الكمومي Quantum Cascade Laser QCL أكثرها شهرة.

قبل استعراض التطبيقات الطبية للتراهرتز، لنر ما أمواج التيراهرتز والخصائص التي تجعل منها أداة مفيدة في التصوير ؟

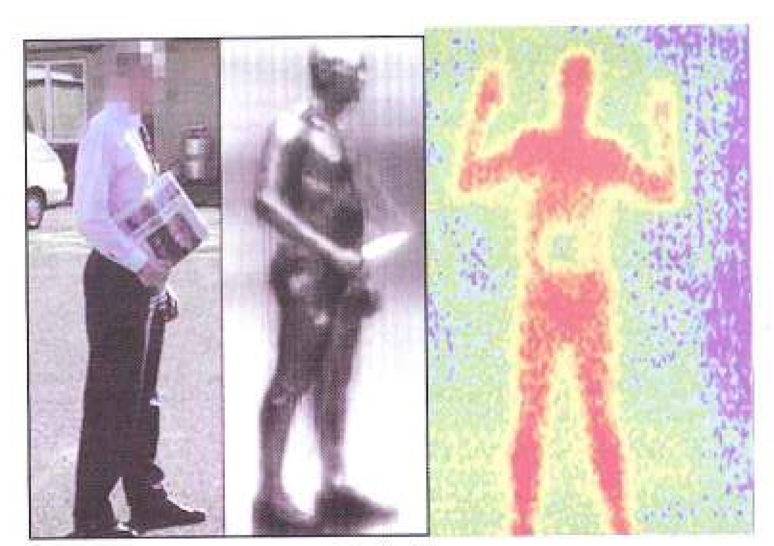
7.3. خصائص أمواج التيراهرتز

أمواج التيراهرتز مأمونة عملياً، وغير هجومية وغير تحطيمية، وغنية بمعلومات معالجة فريدة – قياس في الزمن الحقيقي، ويمكن تطبيقها في مجال واسع من العمليات. من المفيد أن نتذكر مراتب الأطوال الموجية وطاقات فوتونات التيراهرتز. يقدر الطول الموجي لإشعاع كهرطيسي تواتره 1THz في الخلاء بنحو 0.3mm. ومِنْ ثَمَّ تكون المقدرة الفاصلة للصور التي نحصل عليها بهذه الأمواج من المرتبة نفسها.

إن إصدار ذرة أو جزيء لفوتون له التواتر نفسه يقابل انتقالاً بين مستويين للطاقة يفصل بينهما 4.1meV. ومن ثم فإن طاقة الشعاع T ضعيفة نسبياً، وهي أصغر بعشرة آلاف مرة منها في حالة شعاع سيني. إن أطوالها الموجية: الأقصر من الأمواج المكروية والأطول من الأشعة تحت الحمراء تتفق بشكل واضح مع الحركات الاهتزازية للجزيئات الحيوية.

تتميز أمواج التيراهرتز بأنها، كأمواج الراديو، تعبر الكثير من الحواجز : كالثياب أو الأحزمة، والورق، والكرتون والخشب ومواد البناء والمواد البلاستيكية والسراميكية، وغيرها....إلخ. ولكنها، خلافاً لأمواج الراديو، تشبه الضوء في إمكانية تقريبها وتشكيل صور للأجسام بمقدرة فاصلة مناسبة.

7.4. القضايا الأمنية


الشكل7.2

يمكن لإشعاع التيراهرتز أن يخترق المنسوجات والمواد البلاستيكية، ومِنْ ثَمَّ يمكن استخدامه في المراقبة، كالمسح الأمني للكشف عن الأسلحة المخبّأة لدى الأشخاص في المطارات عن بعد (الشكل7.2). ولهذا الأمر أهمية كبيرة لأن معظم المواد المعنية تتميز ببصمات طيفية فريدة في مجال التيراهرتز.

7.5. التيراهرتز والبصمة الجزيئية

تتميز معظم الجزيئات العضوية، بل حتى الجزيئات الأخف ولا سيما الكثير من الملوثات، بتواترات دوران أو اهتزاز أساسية تقع ضمن مجال التيراهرتز. ولهذا عندما تنتقل هذه الجزيئات من مستوى طاقي (دوراني أو اهتزازي) إلى آخر بإصدار أو امتصاص فوتون، غالباً ما يقع تواتر هذا الأخير في مجال التيراهرتز. ومِنْ ثَمَّ يصدر الكثير من الجزيئات العضوية تلقائياً، مثل هذه التواترات، وذلك ضمن إطار حلقة الإثارات والاسترخاءات التلقائية الناجمة عن التهيج الحراري.

إن إشعاع التيراهرتز ضعيف ولو أنه يمكن كشفه حالياً حتى عن بعد. ومن هنا تنشأ إمكانية استخدام تقنيات التصوير الخاملة تماماً، بتعبير آخر ليس ضرورياً إضاءة الجسم بأمواج التيراهرتز التي يولدها المراقب، بل يكفي الكشف عن الأمواج الصادرة عن الجسم نفسه. إن هذه الطريقة الخاملة في المراقبة غير قابلة للكشف- على عكس الرادار، الذي يعطي مثالاً للتقنية الفعالة حيث تؤدي الأمواج التي يرسلها العامل عليها إلى فضحه والغدر به. وهي سمة لها أهميتها في مجال التطبيقات العسكرية.

7.6. التيراهرتز والمطيافية

إن القياس الدقيق لتواترات إصدار المادة أو امتصاصها في مجال التيراهرتز يفسح المجال أمام التعرف على بعض الأنواع الكيميائية المتوافرة فيها. وهذا هو هدف مطيافية التيراهرتز التي تتطلب إضاءة العينة للحصول على إشارة كافية. تصبح مطيافية التيراهرتز، مع تطور المنابع الإلكترونية الضوئية optoelectronic الكثيفة، تقنية توصيف مجرّبة، ويزداد انتشارها في العالم الصناعي.

تتزود مؤسسات القطاعات الغذائية والدوائية مثلاً بتجهيزات مطيافية تجارية للتحكم بمنتجاتها. يستفيد منها أيضاً الجمركيون والعسكريون وعناصر القطاع المدني. إذ تسمح مطيافية التيراهرتز بالكشف عن

وجود مواد غير مسموح بها أو خطيرة مخبأة في حقائب السفر أو الثياب أو المواد الشائعة أو في الأدوات المنزلية. فهي تشكل تقنية إضافية في خدمة مراقبة المسافرين وأمنهم في المطارات. وقد برهنت على فعاليتها في الكشف عن المتفجرات البلاستيكية أو عن العناصر الممرضة التي ينظر إليها على أنها أسلحة بيولوجية. وقد تم البرهان في الولايات المتحدة، بعد اعتداءات الحادي عشر من أيلول 2001، في المختبر أنه يمكن التمييز بين مغلّف لا يحوي إلاّ الطحين ومغلّف آخر يحوي بكتيريا عصيّة الجمرة الخبيثة المسؤولة عن مرض الحمى الفحمية charbon، من دون فتح المغلّفات.

7.7. التيراهرتز والتصوير الطبي

خلافاً للأشعة السينية، إشعاع التيراهرتز ليس إشعاعاً مؤيناً، وطاقة فوتوناته المنخفضة عموماً لا تضر بالنسج والـ DNA. يمكن لبعض تواترات التيراهرتز أن يخترق بضعة ملمترات في النسيج المنخفض المحتوى المائي (كالنسيج الدهني مثلاً) ويرتدّ عنه. يمكن لإشعاع التيراهرتز أيضاً أن يكشف الاختلافات في المحتوى المائي للنسيج وفي كثافته. ومِنْ ثَمّ يمكن لمثل هذه الطرائق أن تسمح بالكشف عن السرطان الظهاري بنجاح بنظام تصوير مأمون، وغير هجومي وغير مؤلم.

يمكن استخدام بعض التواترات في الحصول على صور ثلاثية الأبعاد للأسنان، ويمكن أن تكون أكثر دقة من التصوير التقليدي بالأشعة السينية في طب الأسنان.

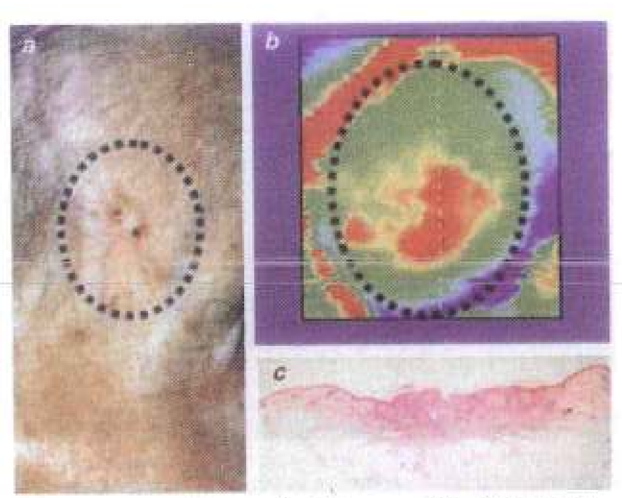
ولما كان ينضم إلى سلامة هذه التقنية، إمكانية تشكيل صور أو إجراء المطيافية، فإن أمواج التيراهرتز تبدي آفاقاً جديدة في التصوير الطبي. ولكن ثمة قيد مهمّ، لكون الماء (كالمعادن) عاتماً بالنسبة لأمواج التيراهرتز. ولكون جزء كبير من الجسم مكوناً من جزيئات الماء، فإن عمق النسيج الذي يمكن تحليله يختزل إلى بضع مئات المكرومترات، أي إلى كسر من الملمتر. ومِنْ ثَمّ يقتصر مجال تطبيق التصوير الطبي الحيوي بأمواج التيراهرتز عموماً على مناطق كالجلد أو النسج الظهارية (جدار الأمعاء مثلاً).
ولهذا السبب تعدُّ أبحاث السرطان من أهم المجالات الطبية الحيوية المعنية بتصوير التيراهرتز. في الواقع، أكثر من 80% من سرطانات البالغين تصيب النسج الظهارية، وكذلك الأمر سرطانات الجلد والرئة والثدي والخصى. وقد برهن فريق بريطاني في عام 2002 أنه يمكن لنظام التصوير بالتيراهرتز أن يميز بين جلد سليم وآخر مصاب بورم سرطاني في الخلايا القاعدية basal cell carcinoma. وهو الشكل الأكثر شيوعاً (ولكن الأقل خطورة) لسرطانات الجلد لدى الأفراد الذين يتمتعون ببشرة بيضاء: ويسجل سنوياً 50000 حالة جديدة في فرنسا، وهو تواتر في حالة تزايد ثابت منذ 50 عاماً.

يتم تشخيص الورم السرطاني للخلايا القاعدية حالياً بالفحص البصري. حيث يتم التعرف بهذه الطريقة على الأورام السطحية المحددة تماماً التي تقل أقطارها عن 20mm، وتستأصل بالجراحة. ولكن الأورام

السرطانية للخلايا القاعدية غير المعرفة بشكل جيد التي تصيب الطبقات الداخلية فيمكن أن تبلغ 15mm فأكثر قبل أن يتم الكشف عنها بصرياً. تستأصل هذه الأورام بالجراحة المكروغرافية micrography: أي تزال طبقات النسج واحدة تلو الأخرى وتدرس بالمجهر في أثناء التداخل الجراحي، الذي يستمر إلى أن يدل الفحص على أن المقاطع المستخلصة سليمة.

7.7.1. التعرف على سرطانات الجلد

إن الطريقة المتبعة حالياً طويلة وباهظة التكاليف وليست كافية دائماً. وذلك لوقوع معظم الأورام في رؤوس المرضى ورقابهم فيجب إزالة ليس كامل النسج المصابة فحسب بل الحد الأدنى من النسيج السليم. ومن المؤكد أن الفحص البصري لا يسمح دائماً بالكشف عن كامل النسج القطنية المصابة بالورم.



الشكل7.3. (a) ورم سرطاني في صدغ مريض. تسمح صورة التيراهرتز (b) بإظهار المناطق المصابة على سطح الجلد، يؤكد التشخيص الفحص المجهري لمقطع تم الحصول عليه بالخزع.

وإن تحديد مواقع النسج المصابة بالورم السرطاني للخلايا القاعدية بدقة كبيرة يبسط عملية التداخل الجراحي، ويقلل من خطر معاودة المرض ويخفف من عمليات إعادة بناء الجلد.

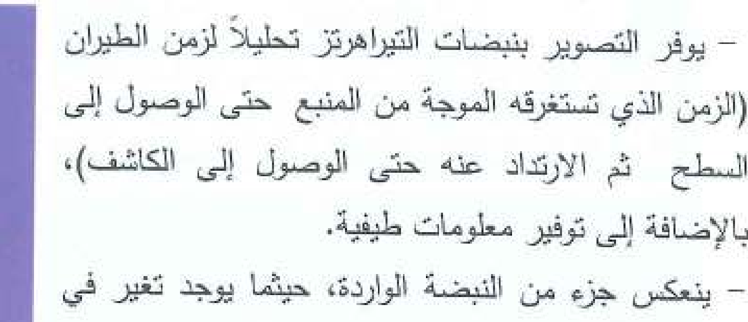
يزودنا تصوير التيراهرتز بالوسيلة (الشكل7.3). حيث يمكن بنبضات التيراهرتز مسح سطح الجلد المشكوك فيه نقطة فنقطة. حيث يستغرق مسح سطح جلدي تقدر مساحته بنحو $5cm^2$ نحو دقيقة واحدة. لدى تحليل النبضات المنعكسة عن الجلد يمكن بناء صورة تكاد تكون ثلاثية الأبعاد أي تمتد على عمق صغير من الجلد.

وهكذا يمكن للأطباء التأكد من وجود فرق واضح بين النسج المريضة والسليمة على هذه الصور للمريض نفسه، حيث يعكس تباين الصور على الأرجح محتوى النسج من الماء (الماء يمتص إشعاع التيراهرتز).

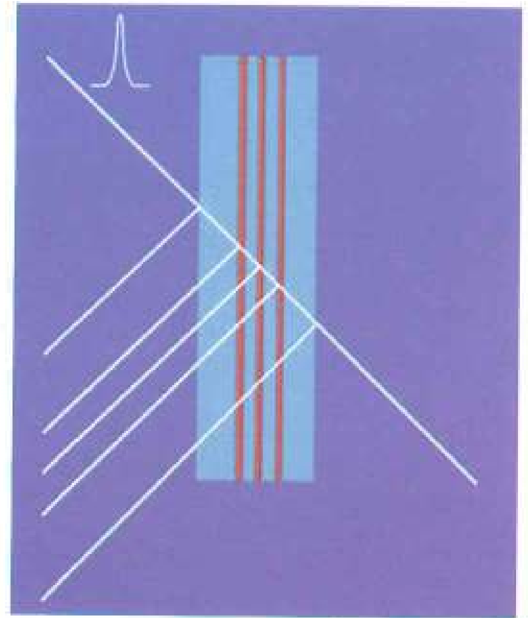
7.7.2. مبدأ التصوير بنبضات التيراهرتز

ثمة تطبيق آخر ممكن لأمواج التيراهرتز يسر أولئك الذين يعانون رهاب العيادات السنية. يتناول هذا التطبيق إظهار الأسنان المنخورة وفق أبعاد ثلاثة والكشف عن التجاويف الموجودة تحت ميناء السن. يظهر نخر السن نتيجة تلف طبقة السن الخارجية موضعياً، أي الميناء. إن الحموض التي تفرزها بكتيريا اللويحة السنية dental plaque تهاجم الميناء، ويمكن للإصابة أن تمتد إلى العاج dentine- وهو العاج

الذي يغطيه الميناء- من دون أن يبدي سطح السن أي شقوق أو ثقوب مرئية: إن الصور الشعاعية للأسنان التي يزاولها أطباء الأسنان حالياً لا تكشف النخر إلاّ في مرحلة متقدمة جداً من تطوره، حين لا يبقى إلاّ المثقب والحشوة parade وسيلة للعلاج. أما بالكشف عن التغير في وقت مبكر فيمكن التفكير بقلب العملية بإعادة تعدين الشق.



- يوفر التصوير بنبضات التيراهرتز تحليلاً لزمن الطيران (الزمن الذي تستغرقه الموجة من المنبع حتى الوصول إلى السطح ثم الارتداد عنه حتى الوصول إلى الكاشف)، بالإضافة إلى توفير معلومات طيفية.
- ينعكس جزء من النبضة الواردة، حيثما يوجد تغير في قرينة الانكسار.
- تسمح إعادة بناء النبضات المتعددة التي يتم استقبالها برسم البروفيل بدلالة العمق. تسمح عملية المسح لكامل سطح السن بالحصول على صورة ثلاثية الأبعاد.



الشكل7.4. مبدأ التصوير بنبضات التيراهرتز

يمكن التمييز بين مختلف النسج التي يتركب منها السن من خلال قرائن كسرها لتواترات التيراهرتز. حيث تتناسب قرينة انكسار وسط مادي معين عكسياً مع سرعة الأمواج في ذلك الوسط. بتعبير آخر، يمكن بقياس زمن طيران نبضات التيراهرتز التي تعبر السن، تمييز الميناء من العاج مثلاً. ومِنْ ثَمَّ إمكانية تقدير ثخانة طبقة الميناء التي تنخفض عندما يعاني المريض التآكل السني (تلف غير متوضع لميناء السن غالباً ما ينجم عن تناول المشروبات الغازية والحموض).

كما يمكن بقياس امتصاص أمواج التيراهرتز وليس زمن طيرانها، التوصل إلى معلومات أخرى، وهي القدرة الامتصاصية التي تختلف تبعاً لمحتوى النسيج من المعادن. يمكن بذلك التعرف على وجود تجويف في داخل السن لا يظهر بالضرورة من خلال الفحص البصري أو بالأشعة السينية (الشكل7.4). يمكن لأشعة T، كما توحي الأمثلة المذكورة، أن تزودنا بعدة مشاهد للجسم نفسه، وذلك حسب ما يقع الاختيار على قياس امتصاص الإشعاع أو قرينة انكسار الوسط الذي تمر فيه(الشكل7.5).





الشكل7.5. (في الأعلى) صورة لنخر في السن بأشعة التيراهرتز تم الحصول عليها بالاعتماد على بيانات الامتصاص. وفي الأسفل صورة للسن تم الحصول عليها بالاعتماد على زمن الطيران.

كما ينطبق هذا الأمر على أي من تواترات مجال التيراهرتز، الأمر الذي يفتح مجالاً واسعاً من الإمكانيات على تصوير التيراهرتز. فالمواد غير المرئية بالنسبة للتواتر 500GHz مثلاً يمكن الكشف عنها بالأمواج ذات التواتر الأعلى. يمكن لاستغلال البصمات الطيفية للجزيئات عموماً أن يحسن إمكانيات التشخيص بتصوير التيراهرتز. باتباع هذا الطريق يتم البحث في تطوير أجهزة لكشف أنواع الأورام كلها، ويمكن بعد سنتين أو ثلاث سنوات من الآن أن تظهر في السوق أجهزة موجهة إلى تصوير الثدي والتعرف على سرطانات الجلد.

ما يزال يحتاج الأمر، طبعاً، إلى بذل جهود كبيرة لكي ينتقل تصوير التيراهرتز من مختبرات البحث إلى العيادة أو إلى مختبر التحاليل الطبية. ولكن بعد خمس سنوات من الآن يجب أن تتوافر الأجهزة الكثيفة الأولى وبتكلفة مقبولة. أخيراً من الجدير بالذكر أن القطاع الطبي ليس القطاع الوحيد المعني بالأمر: فأمواج التيراهرتز تجد منافذ لها في المجال العسكري أو الأمن المدني (الرؤية من خلال الدخان أو الكشف عن المتفجرات) وفي حماية البيئة (الكشف عن الملوثات) بل في الاتصالات (النقل اللاسلكي على مسافات قصيرة وبتصريف كبير جداً) أو في المعلوميات (مكونات تواتر التوقيت فيها مرتفع) فهل يكون مستقبل أشعة T مشرقاً؟

وقد كان كل من مجالي الفلك والكيمياء تاريخياً القوة المحركة لابتكار منابع وكواشف في مجال التيراهرتز؛ لأن التجاوبات الدورانية والاهتزازية للجزيئات بالإضافة إلى الإصدار الحراري في الطيف الجزيئي تؤدي دوراً مهماً هنا. ولو أن التقدم الذي طرأ مؤخراً يجعل إشعاع التيراهرتز مغرياً لمجال أوسع بكثير من الفعاليات (الشكل7.6).

- توصيف الخصائص الأساسية للمواد كتركيز حاملات الشحنة، وحركيتها وعصابة الطاقة في النواقل الفائقة العالية درجة الحرارة.
- التحكم في جودة الصناعات نصف الناقلة والصيدلانية.
- دراسة البروتينات وكيفية تأثيرها في الجسم من أجل تشكيل الدواء.
- التصوير الطبي والتشخيص: الكشف عن السرطان، الكشف المبكر عن النخور السنية والعناية بالبشرة.
- المسح الأمني وتفتيش البريد للكشف عن أجسام أو مواد لا معدنية مؤذية



الشكل7.6. جرت دراسة الأدوات التيراهرتزية، واستخدمت تدريجياً في إجراء عمليات التفتيش الأمنية للكشف عن المواد غير الشرعية أو الخطيرة، وفي التصوير والتشخيص الطبيين، والتحكم بجودة المنتجات الصناعية...إلخ.

تركز فعاليّات البحوث التي تجري حالياً في مجال إشعاع التيراهرتز بشكل رئيسيّ على ابتكار مواد جديدة لتوليد نبضات قصيرة من إشعاع التيراهرتز ،تسمح بتطوير طرائق التصوير التيراهرتزي في الزمن الحقيقي.

توفر أمواج التيراهرتز غير المرئية بالنسبة للعين المجرّدة، رؤية بشرية فائقة 'superhuman vision'. إذ يمكن بالتصوير التيراهرتزي رؤية الجسم تحت الثياب، وليس العظام التي نراها بالأشعة السينية فحسب.

وأخيراً، يمكن لأمواج التيراهرتز أن تتعرّف على المواد، وأن توفّر المعلومات البنيوية عنها. إذْ يمكن عن طريق امتصاص الجزيئات المختلفة لأمواج التيراهرتز وعكسها لها، التعرُّف على تركيبها، فهي تتميز بما يدعى البصمة التيراهرتزية "terahertz fingerprint'. الأمر الذي يجعل التقنية مفيدة بشكلٍ خاصّ في التطبيقات الصيدلانية التي تستدعي السرعة والدقة في تحديد تركيب الأدوية.

7.8. منشأ البصمة الجزيئية

للتعرف على منشأ البصمة الجزيئية نحتاج إلى فهم الروابط التي تمسك الذرات معاً لتشكيل الجزيئات ورؤية كيفية تأثير الحركات الدورانية والاهتزازية للجزيئات على الأطياف.

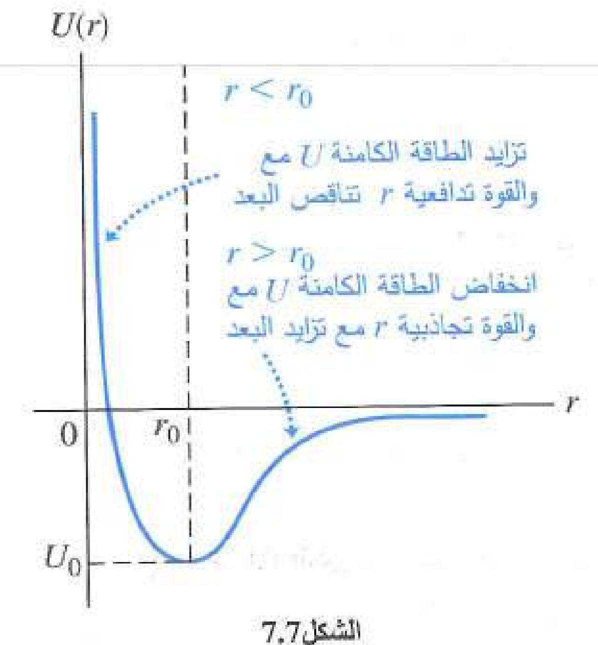
7.8.1. تشكل الجزيئات والروابط

ترتبط الذرات فيما بينها بطرائق متعددة لتشكيل ترتيبات أكثر تعقيداً، وتختلف شدة الترابط باختلاف نوع التجاذب الكهراكدي electrostatic attraction المهيمن. فإذا انتقل إلكترون من ذرة أولى في الجزيئة واستقر في ذرة أخرى منها كانت القوة الرابطة من التجاذب بين الأيونات لذلك تسمى الروابط الإيونية ionic bonds وقد لايكون الانتقال كاملاً بل تتشارك الذرات إلكتروناتها، فتسمى الروابط الروابط المشتركة covalent bonds. ويعدّ هذا الترابط قوياً في نوعي الروابط ويقدر (1-5eV)، بينما تتضمن الروابط الأضعف (0.5eV or less) تشارك في البروتونات فتسمى الروابط هدروجينية، والأضعف منها روابط فاندرفالس van der Waals bonds فيكون التجاذب بين ذرات معتدلة كهربائياً لكن كل منها ثنائي قطب كهربائي والتجاذب بينها مثل تجاذب ثنائيات أقطاب. وقد يحدث أن تكوّن مجموعة من الذرات رابطة قوية فيما بينها، ولكنها موجودة بجوار مجموعة أخرى من الذرات عندئذ يمكن الحديث عن قوى التجاذب بين المجموعتين كحديثنا عن الذرتين، وغالباً يحدث هذا في حالة الجزيئات العضوية ذات البنى الوظيفية، أي في الجزيئات العملاقة متعددة الذرات.

الرابطة الإيونية. تفاعل بين ذرتين متأينتين متعاكستين في الشحنة، مثل Na^+ وCl^- بطاقة ارتباط قدرها 4.2eV. يبين الشكل7.7 خطاً بيانياً للطاقة الكامنة لإيونين متعاكسين في الشحنة.

مثال7.1. ما الطاقة الكامنة الكهراكدية لزوج من الإيونات Na^+ وCl^- يفصل بينهما بعدهما التوازني 0.24 nm؟ الطاقة الفعلية -5.7 eV

لننظر إلى الإيونين +Na و-Cl على أنهما +e و -e



الشكل7.7

$$U = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r} = -6.0eV$$

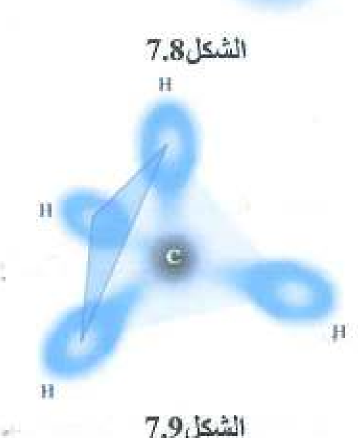
الرابطة المشتركة

تكون الإلكترونات في الرابطة المشتركة أكثر تشاركية بين ذرات الجزيء. إذْ تكون التوابع الموجية للطبقات الخارجية مشوهة، وتصبح أكثر تركيزاً في مناطق معينة. يبين الشكل 7.8 رابطة الهدروجين المشتركة (طاقة الارتباط 4.8eV-)، بينما يتضمن الشكل7.9 جزيء الميثان.

عندما تتشكل الجزيئات يمكن معالجتها من وجهة نظر ميكانيك الكم جملة واحدة نبحث عن تابعها الموجي ومستويات الطاقة المتاحة لهذه الجملة. وبالتشابه مع معالجة الذرة، يمكن الحديث عن مستويات طاقة رئيسية تحكمها n و l ومستويات طاقة فرعية تحكمها l و m يوجد للجزيئة مستويات طاقة تباعدها كبير ومستويات طاقة تباعدها صغير آتية من معالجة الجزيئة جسيماً صلباً يمكنه الدوران أو الاهتزاز داخلياً بين ذراته وروابطه.



الشكل 7.8



الشكل 7.9

مستويات الطاقة الدورانية

تخضع الذرات فور ارتباط ذرتين أو أكثر في جزيء بالقيام بحركات دورانية واهتزازية مختلفة. ونظراً لصغر حجم الذرات فإن هذه الحركات تكمّى في حالات طاقية دورانية Rotational energy levels مسموحة معينة. على سبيل المثال يمكن نمذجة الحركة الدورانية لجزيء ثنائي الذرة على النحو المبين في الشكل7.10a.

وقد سبق ورأينا أن الكتلة المعنية في الحركات الدورانية والاهتزازية هي الكتلة المختزلة:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

ثمة تشابه جميل مع الحركة الدورانية التقليدية:

$$L = I\omega \quad و \quad K = \tfrac{1}{2} I\omega^2$$

وفي حالة ذرة معزولة يكون $K = E = \dfrac{L^2}{2I}$ لأن $U = 0$.

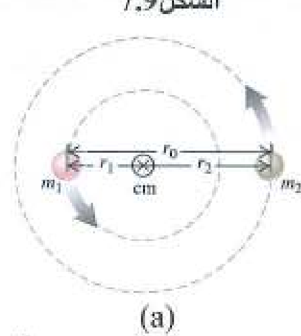
إن الحلول الزاوية لمعادلة شرودنغر Schrödinger equation، هي نفسها لجزيء الهدروجين لا يعتمد أي منهما على U، ومن ثم :

$$L = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar$$

وبجمع هذا مع اعتماد الطاقة التقليدية على L، لدينا الطاقات المكمّاة.

$$E_l = l(l+1)\frac{\hbar^2}{2I} = l(l+1)\frac{\hbar^2}{2\mu r_0^2}$$

(مستويات الطاقة الدورانية للجزيء الثنائي الذرة)



(a)

E
$10\hbar^2/I$ — $l = 4$
$6\hbar^2/I$ — $l = 3$
$3\hbar^2/I$ — $l = 2$
$\hbar^2/I$ — $l = 1$
0 — $l = 0$

(b)

الشكل 7.10

يبين الشكل7.10b مستويات الطاقة الدورانية للجزيء الثنائي الذرة.

مثال7.2. الكتلتان الذريتان لذرتي CO $m_C = 1.993\times10^{-26}kg$ و $m_O = 2.656\times10^{-26}kg$ والبعد بينهما 0.1128nm. (a) أوجد طاقات المستويات الطاقية الدورانية الثلاثة الأخفض لـ CO.

$$\mu = \frac{(1.993)(2.656)}{1.993+2.656}\times10^{-26}kg = 1.139\times10^{-26}kg$$

$$I = \mu r_0^2 = (1.139\times10^{-26}kg)(0.1128\times10^{-9}m)^2 = 1.449\times10^{-46}kgm^2$$

$$E_0 = 0$$

$$E_1 = l(l+1)\frac{\hbar^2}{2I} = 2\frac{(1.055\times10^{-34})^2}{2(1.449\times10^{-46})} = 0.479\,\text{meV}$$

$$E_2 = 6\frac{(1.055\times10^{-34})^2}{2(1.449\times10^{-46})} = 1.437\,\text{meV}$$

(b) أوجد طول موجة الفوتون الصادر لدى الانتقال من المستوى الدوران $l=2$ إلى $l=1$.

$$\lambda = \frac{hc}{E_2 - E_1} = 1.29mm$$



المستويات الطاقية الاهتزازية Vibrational energy levels

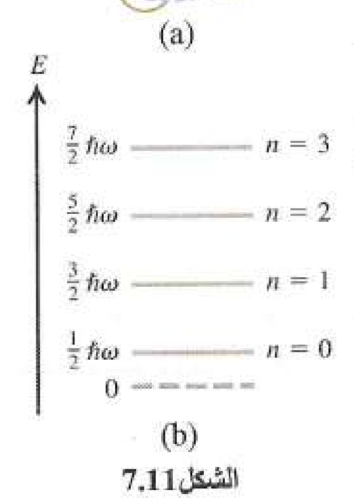
وبالمثل يقوم الجزيء الثنائي الذرة بالاهتزاز، كما في المماثل التقليدي (الشكل7.11a) كتلتان على نابض. تهتز الذرتان كلتاهما حول مركز كتلتيهما، وهنا أيضاً الكتلة المعنية هي الكتلة المختزلة. ولهذه الجملة المستويات الطاقية نفسها لما يدعى الهزاز التوافقي.

تعطى مستويات الطاقة بالعلاقة

$$E_n = (n+\tfrac{1}{2})\hbar\omega = (n+\tfrac{1}{2})\hbar\sqrt{\frac{k'}{\mu}}$$

حيث k' ثابت النابض.

(a)



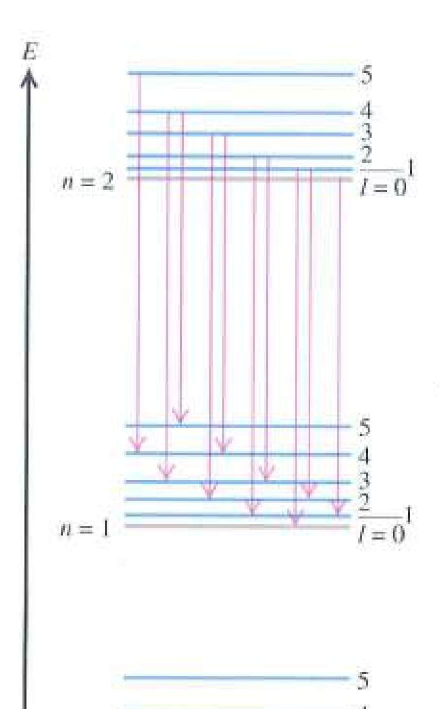
(b)

الشكل7.11

يبين الشكل 7.11b بعض المستويات الطاقية الاهتزازية لجزيء ثنائي الذرة.

بالجمع بين الحركات الدورانية والاهتزازية لدينا:

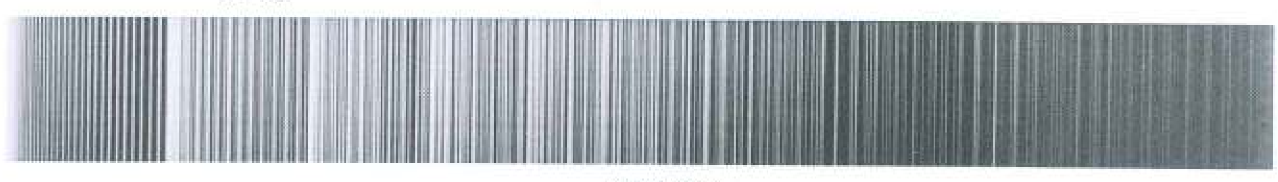
$$E_{nl} = l(l+1)\frac{\hbar^2}{2I} + (n+\tfrac{1}{2})\hbar\sqrt{\frac{k'}{\mu}}$$



الشكل7.12

يبين الشكل 7.12 مخطط المستويات الطاقية للمستويات الطاقية الدورانية والاهتزازية في جزيء ثنائي الذرة. ويبين الشكل 7.13 الطيف العصابي الجزيئي النموذجي.

تتطلب قواعد الميكانيك الكمومي أن يكون $\Delta l = \pm 1$ و $\Delta n = \pm 1$ (الزائد لامتصاص فوتون والناقص لإصدار فوتون). تدل الأسهم في الشكل على الانتقالات المسموحة من المستويات $n = 2$.

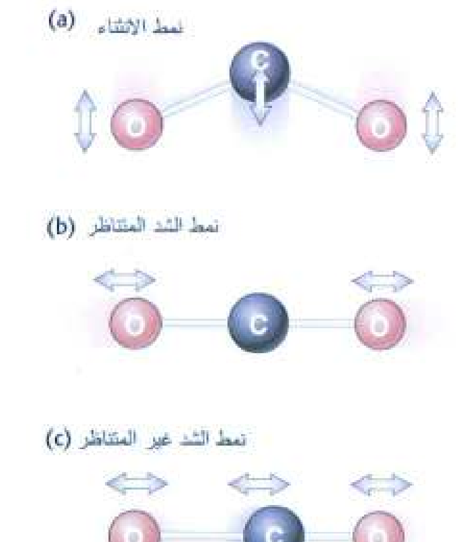

الشكل7.12

الجزيئات المعقدة Complex Molecules

تتمتع الجزيئات الأكثر تعقيداً كجزيء ثنائي أكسيد الكربون CO_2 بأنماط اهتزاز إضافية كما هو مبين تخطيطياً في الشكل 7.13. يخضع كل من هذه الحركات لقواعد تكمية خاصة به، إذْ يفصل بين كل اثنين من المستويات الطاقية أقل1eV ومِنْ ثَمَّ فهي تولد فوتونات تحت الأحمر بطول موجي يزيد على 1μm.

إن هذه الحقيقة تجعل من غاز CO_2 فعالاً جداً كغاز للبيوت الزجاجية، يمتص الحرارة من الأرض ويأسرها في الغلاف الجوي.

يتكون غلاف الزهرة Venus' كلياً تقريباً من CO_2 ومن ثم فإن درجة حرارة سطح الزهرة نحو 800K. ويعد الميثان أكثر فعالية كغاز للبيوت الزجاجية.



الشكل7.13

الفصل الثامن

الأمواج المكروية

Microwave

8.1. موقع الأمواج المكروية في الطيف الكهرطيسي

تحتل الأمواج المكروية الجزء ذا التواتر الأعلى والطول الموجي الأقصر من طيف الأمواج الراديوية، وهي تقع بين الأمواج الراديوية وأشعة التيراهرتز. وقد كان (1894–1857) Heinrich Hertz أول من قام بتوليد الأمواج المكروية والكشف عنها في المختبر في عام 1888.

تتضمن الأمواج المكروية أطوالاً موجية منها ما يصل طوله إلى المتر ومنها بقصر الملمتر، وتمتد تواتراتها من 300MHz (100cm) إلى 300GHz (0.1cm). يتضمن هذا التعريف الواسع الأمواج الملمترية UHF و EHF على السواء، هذا وتستخدم المنابع المختلفة حدوداً مختلفة لهذه الأمواج. تتضمن الأمواج المكروية في كل الحالات كامل العصابة HF(super high frequency) (التي تمتد من 3GHz إلى 30GHz أو من 10cm إلى 1cm) في أدنى حد، بينما غالباً ما تقتصر الهندسة الراديوية RF Engineering على المجال من 1GHz إلى 100GHz (300mm و 3mm).

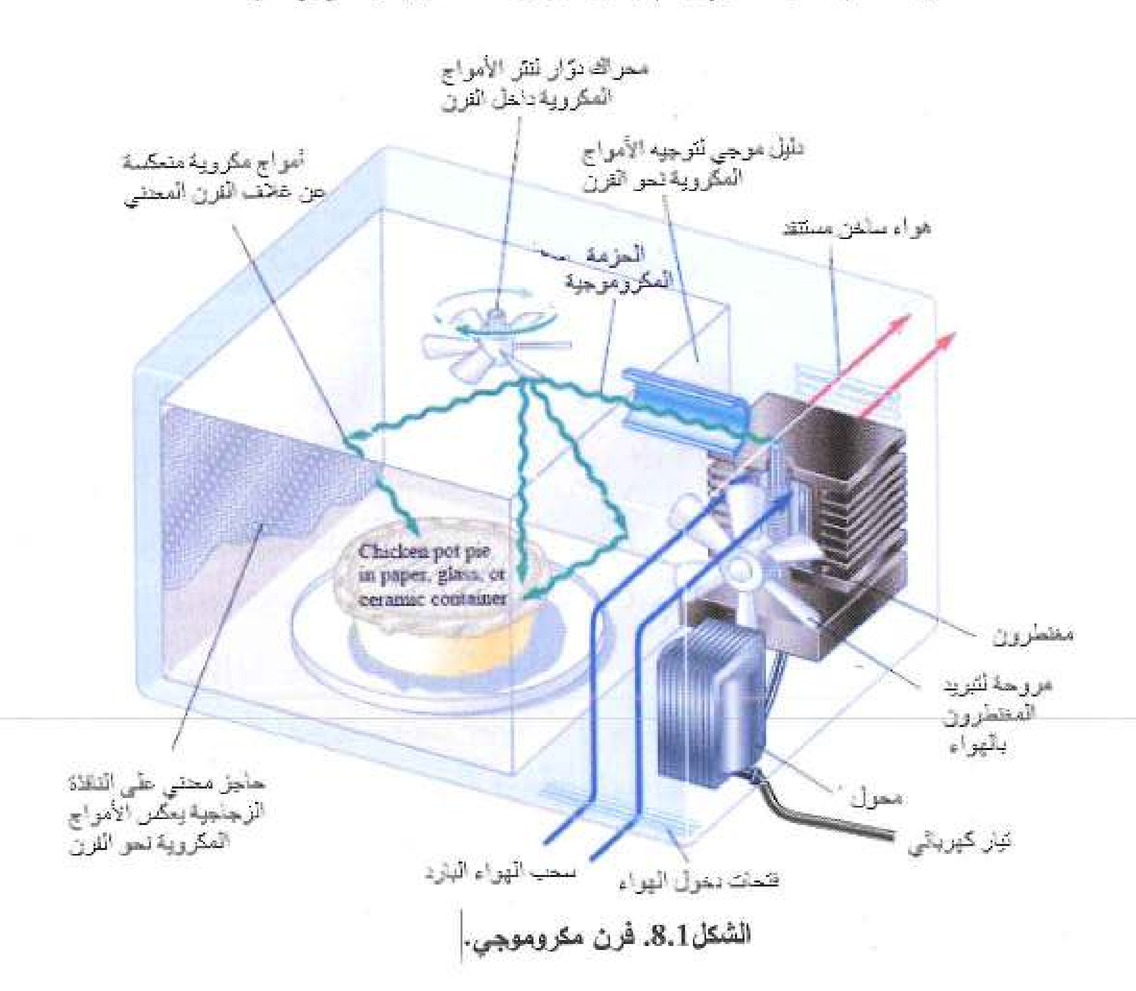
إن البادئة micro في الموجة المكروية لا تعني أن الطول الموجي يقع في مجال المكرومتر. فهي تدل على أن الأطوال الموجية قصيرة مقارنة بالأمواج المستخدمة في البث الراديوي radiobroadcasting، من حيث إن أطوالها الموجية أقصر. إن الحدود بين تحت الأحمر البعيد far infrared وإشعاع التيراهرتز terahertz radiation والأمواج المكروية microwaves والتواتر الشديد الارتفاع وأمواج الراديو اختيارية إلى حدٍّ ما تماماً، وتستخدم بشكل مختلف في مجالات العلوم المتنوّعة.

8.2. الأجهزة التي تستخدم الأمواج المكروية

استخدمت الأمواج المكروية في الاتصالات: الهواتف النقالة والتلفزة بالأقمار الصناعية والرادار Radio Detecting And Ranging. وبعد ابتكار الرادار في الحرب العالمية الثانية، أدت بحوث الأمواج المكروية إلى ابتكار أجهزة للاستخدامات السلمية ومنها الفرن المكروموجي microwave oven (الشكل 8.1).

تقع الأطوال الموجية المكروية المستعملة في أجهزة الهاتف النقال والأقمار الصناعية بين 1cm و 20cm. كما يؤدي الحقل الكهربائي المهتز، في الأفران المكروموجية، إلى جعل جزيئات الماء تقوم بحركات

دورانية rotational motion بتواتر 10^9 مرة في الثانية مسببة الامتصاص والاحتكاك ما يسخن الطعام بسرعة لاحتوائه الماء في معظم مكوناته ومِنْ ثَمَّ يكون مردود التسخين مباشراً وعالياً.



الشكل8.1. فرن مكروموجي.

8.3. خاصة الانعكاسية للأمواج المكروية

تتولد الأمواج المكروية في الفرن المكروموجي (الشكل8.1) في مغنطرون Magnetron، وهو تجويف مجاوب يولد تيارات مهتزة تصدر أمواجاً مكروية بالتواتر المطلوب. ولما كانت المعادن تعكس جيداً الأمواج المكروية، يتضمن الفرن دليلاً موجياً معدنياً metallic wave guide يوجه الأمواج المكروية نحو محراك معدني دوّار rotating paddle يعكس الأمواج المكروية في الكثير من الاتجاهات المختلفة لتوزيعها على الفرن كلّه. (إن خاصة الانعكاسية هذه هي سبب النصح بعدم استخدام أوعية معدنية أو ورق ألمنيوم في تغليف الأطعمة المراد تسخينها؛ إذْ يسبب هذا النوع من الأغلفة عدم وصول الأمواج المكروية إلى ما في داخل الوعاء، وقد تحدث نقاطاً حارة تسبب الاشتعال أو تخريب جدران الفرن). يحاط تجويف الفرن بغلاف معدني لإعادة عكس الأمواج المكروية وتخفيض مقدار التسرب من الأمواج. كما توجد شاشة معدنية على زجاج باب الفرن ثقوبها صغيرة تمكّن رؤية ما بداخله، غير أنه لما كانت الثقوب أصغر بكثير من طول الموجة المكروية، تستمر الشاشة بعكس الأمواج المكروية.

8.4. آلية التسخين

يغمر الفرن المكروموجي الطعام بالأمواج المكروية بطول موجي خلائي يقدر بنحو 12cm. يعد الماء ماصاً جيداً للأمواج المكروية لأن جزيء الماء قطبي. عندما يخضع ثنائي قطب كهربائي لحقل كهربائي فإنه يخضع لعزم يسعى لتوجيه ثنائي القطب باتجاه الحقل، لأن الشحنتين الموجبة والسالبة تتزاحان في اتجاهين متعاكسين، وكنتيجة للحقل الكهربائي للأمواج المكروية السريع الاهتزاز $f = 2.5\,\text{GHz}$ تدور جزيئات الماء في الاتجاهين لتلحق باتجاه الحقل، فتمتص طاقة من الحقل وترتفع درجة حرارتها، ثم تنتشر هذه الطاقة في جزيئات الطعام الأخرى. أصبحت الأفران المكروموجية من أدوات المطبخ الشائعة في البلاد الغربية منذ أواخر السبعينيات، عقب ابتكار المغنطرونات التجويفية الأقل تكلفة.

في عام 1955 كان الدكتور James Lovelock قادراً على إنعاش reanimate جرذان متجمدة في الدرجة 0 °C باستخدام العلاج بالإنفاذ الحراري المكروموجي الحراري diathermy، كما كانت طريقة للعلاج الفيزيائي تستعمل فيها تيارات كهربائية عالية التردد لإحداث تسخين موضعي في الأنسجة الحية.

تستخدم العصا الكهربائية Less-than-lethal weaponry، التي تستعملها الشرطة، أمواجاً ملمترية لتسخين طبقة رقيقة من جلد الإنسان إلى درجة من الحرارة لاتطاق لإبعاد الشخص المستهدف. إذْ يؤدي تطبيق حزمة مركزة بتواتر 95GHz لمدة ثانيتين إلى تسخين الجلد إلى الدرجة 54°C (129°F) إلى عمق 0.4 mm.

8.5. الأمواج المكروية في الفضاء

في بداية الستينيات 1964 كانت تواجه العالمين الفلكيين Arno Penzias و Robert Wilson مشاكل في منظارهما الراديوي؛ فقد كانا منزعجين من الضجيج في المجال المكروموجي من الطيف. وكان ينصب اهتمامهما في البحث عن جزيئات في الغيوم الغازية بين النجمية في الفضاء؛ لكنهم فوجئوا بوجود ضجيج كيفما وجها منظارهما بعيداً عن الطول الموجي المستهدف. وقد قادت الدراسة التالية إلى اكتشاف أن الكون بكامله يسبح بالأمواج المكروية التي تقابل إشعاع الجسم الأسود عند درجة الحرارة $2.7^{o}K$ (الطول الموجي الموافق للنهاية العظمى 1mm). ويعد إشعاع الخلفية المكروموجي الكوني من مخلفات منشأ الكون– انفجار هائل يدعى الانفجار الأعظم Big Bang. وقد شاركا بجائزة نوبل للعام 1978 لاكتشافهما هذا.

8.6. تأثير الأمواج المكروية على الصحة وحروق الأمواج المكروية

الأمواج المكروية لا تحمل طاقة كافية لتأيين المواد، ومِنْ ثَمّ فهي مثال عن الأشعة غير المؤينة. تعود كلمة إشعاع هنا إلى الطاقة التي يصدرها منبع وليس إلى النشاط الإشعاعي. ولم يتبين بشكل قاطع أن الأمواج المكروية (أو الإشعاع الكهرطيسي غير المؤين) له آثار بيولوجية سيئة عند مستويات منخفضة.

توحي بعض الدراسات وليس جميعها أن التعرض لها على المدى الطويل يمكن أن يكون له آثار مسرطنة، ولاسيّما على الخلايا الوليدة. هذا أمر مختلف عن الأخطار التي ترافق التعرض لشدات عالية جداً، التي يمكن أن تسبب التسخين والحروق كأي منبع حراري وليست خاصة تنفرد بها الأمواج المكروية تحديداً.

فقد لوحظ في أثناء الحرب العالمية الثانية أن الأفراد الذين يقعون في مسار منشآت الرادار يعانون القرقعات وأصوات الطنين استجابة للإشعاع. كان يعتقد أن التأثير المكروموجي على السمع ينجم عن الأمواج المكروية التي تحرض تياراً كهربائياً في مراكز السمع في الدماغ. وقد دل البحث التي قامت به الناسا NASA في السبعينيات أن ذلك ينجم عن التوسع الحراري في أجزاء من الأذن الداخلية.

عند حدوث ضرر نتيجة للتعرض لأمواج مكروية، فإنه يحدث عادة من التسخين الكهرنفوذي المتحرض في الجسم. يمكن للتعرض إلى الإشعاع المكروموجي أن يحدث السادّ cataracts بهذه الآلية، لأن التسخين المكروموجي يفسد denatures البروتينات (يفقدها طبيعتها) في العدسة البلورية للعين، بالطريقة نفسها التي تحوّل فيها الحرارة بياض البيض إلى اللون الأبيض والعاتم. ويعد كل من العدسة والقرنية سريع العطب بشكل خاص لعدم احتوائهما على أوعية دموية يمكن أن تفرغهما من الحرارة. يمكن للتعرض إلى جرعات ثقيلة من الإشعاع المكروموجي، كإشعاعات فرن مكروموجي مفتوح، أن يحدث ضرراً حرارياً في نسج أخرى أيضاً لتشمل حروقاً خطيرة يمكن ألّا تظهر فوراً نظراً لميل الأمواج المكروية إلى تسخين النسج الأعمق ذات المحتوى المائي الأكبر.

تتطلب دراسة التسخين والحروق معرفة البنية الطيفية للإشعاع المسخن، إذ إنها عشوائية بصورة عامة كونها حرارية، يدعى مثل هذا التمثيل للبنية الطيفية كثافة الاستطاعة الطيفية Power spectral density للعملية العشوائية. وقد وجد الإشعاع الكهرطيسي العشوائي الذي يتطلب هذا النوع من التحليل، مثلاً، في قلب النجوم، وفي أشكال أخرى عريضة العصابة جداً من الإشعاع كحقل موجي درجة الصفر للخلاء الكهرطيسي.

8.7. تأثرات الإشعاع الكهرطيسي مع المادة

يتأثر الإشعاع الكهرطيسي مع المادة تأثرات مختلفة تبعاً لتواتره. وبما أن الأطوال الموجية للأمواج **الراديوية والمكروية كبيرة** فإن تأثر الإشعاع الكهرطيسي المكروي مع المادة يعمل في مجموعة كبيرة من الشحنات التي تنتشر على عدد كبير من الذرات المتأثرة. تؤدي هذه الحركة الجماعية للشحنات، أي التيارات الكهربائية في النواقل الكهربائية، إلى الامتصاص الشديد للإشعاع المكروي. وقد يؤدي إلى انفصالات أخرى للشحنات متسارعة تؤدي إلى توليد إشعاع كهرطيسي جديد. ومن الأمثلة على ذلك استقبال الهوائيات للأمواج الراديوية أو إصدارها، وكذلك امتصاص جزيئات الماء أو جزيئات أخرى تتمتع

بعزم ذي قطبين كهربائي للأمواج المكروية. من شأن هذه التأثرات أن تولد التيارات الكهربائية أو الحرارة أو كليهما.

ففوتونات الضوء المرئي مثلاً، تسبب تغيراً في روابط جزيء الرُّدُبْسِن rhodopsin في شبكية عين الإنسان لدى امتصاصه الضوء. ويصبح الاصطناع الضوئي ممكناً في هذا المجال أيضاً حيث يثار جزيء الكلوروفيل بفوتون وحيد. كما تستخدم الحيوانات التي تكشف تحت الأحمر رزماً صغيرة من الماء لتغير درجة الحرارة في عملية حرارية أساسية تتضمن الكثير من الفوتونات. ولهذا يعتقد بأن الأشعة تحت الحمراء والأمواج المكروية والراديوية لا تحطم الخلايا والنسج البيولوجية إلّا بالتسخين الجماعي وليس بالإثارة بفوتونات مفردة من الإشعاع. ومع زيادة تواتر الأمواج الكهرطيسية يزداد إمكان تأيين الذرات أو الجزيئات بفعل فوتون وحيد، مبتعدة قليلاً عن الأثر الجماعي.

8.8. الآثار الحيوية للإشعاعات الكهرطيسية

الكهرطيسية الحيوية Bioelectromagnetics هي دراسة تفاعلات وتأثرات الإشعاع الكهرطيسي في المتعضيات الحية. تعتمد مفعولات الإشعاع الكهرطيسي في الخلايا الحية، بما فيها الخلايا البشرية، على استطاعة الإشعاع وتواتره. غير أنه في حالة الإشعاع المنخفض التواتر مثل الأمواج الراديوية حتى الضوء المرئي تعتمد التأثرات على استطاعة الإشعاع فإذا أثرت من خلال التسخين لدى امتصاص الإشعاع لا يكون التواتر مهماً، في حالة هذه المفعولات الحرارية، إلّا من حيث تأثيره في عمق اختراقه للعضوية (اختراق الأمواج المكروية للعضوية مثلاً أفضل منه في حالة الأشعة تحت الحمراء). كان يعتقد في بادئ الأمر أنه لا يمكن للحقول المنخفضة التواتر، والأضعف بكثير من أن تحدث مفعول تسخين ملحوظاً، أن تحدث أيَّ مفعولٍ حيويٍّ.

لكنه تراكمت البراهين لدى الباحثين تخالف هذا الرأي و تدعم وجود آثار بيولوجية معقدة لحقول كهرطيسية لاحرارية ضعيفة جداً Extremely low frequency ELF، وكذلك حقول التواتر الراديوية المكيفة والأمواج المكروية. غير أنَّ الآليات الأساسية للتفاعل بين المادة البيولوجية والحقول الكهرطيسية عند المستويات اللاحرارية ليست مفهومة تماماً.

قامت منظمة الصحة العالمية بتصنيف الإشعاع الكهرطيسي ذي التواتر الراديوي في المجموعة Group 2B، التي يحتمل أن تكون مسرطنة. تحوي هذه المجموعة مولدات ممكنة للسرطان لها دليل أضعف عند المستوى نفسه للقهوة ومخلفات السيارات. وقد دلت الدراسات التي تبحث عن العلاقة بين استعمال الخلوي وتطور سرطان الدماغ مثلاً أنها غير حاسمة على الإطلاق.

وهكذا نجد أن تأثير الإشعاع الكهرطيسي عند تواترات الـ UV فما فوق في الجمل الحيوية أكبر مما يتنبأ به مجرد التسخين. يكون هذا المفعول أوضح ما يمكن في المجال فوق البنفسجي البعيد (أو الأقصى). تدعى أشعة الـ UV والأشعة السينية وغاما بالإشعاع المؤين ionizing radiation لإمكانية فوتونات هذا الإشعاع توليد الإيونات والجذور الحرة في المواد (بما فيها النسيج الحي). يُنظَرُ لهذا الإشعاع على أنه أشد خطورة بكثير من باقي طيف الإشعاعات الكهرطيسية؛ لأنه يستطيع أن يتلف الحياة بشدة عند مستويات للطاقة تولد تسخيناً ضئيلاً.

الفصل التاسع

أنواع الليزرات وخصائصها

Lasers & Characteristics

إن كلمة ليزر LASER منحوتة من العبارة التي تعني تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث للإشعاع Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation، إذْ تعني كلمة ضوء light عموماً الإشعاع الكهرطيسي مهما كان تواتره، وليس الضوء المرئي فحسب؛ بل يعني منذ الآن ليزر الأشعة تحت الحمراء وليزر الأشعة فوق البنفسجية وليزر الأشعة السينية وغيره. ولابتكار سلف الليزر المكروموجي الميزر maser أولاً، فإن الأدوات التي تصدر التواترات المكروموجية والراديوية تدعى ميزرات"masers".

وقد استحدث باللغة الإنكليزية فعل "to lase" ليعني "توليد ضوء الليزر" أو "تطبيق ضوء الليزر على". كما تستعمل كلمة ليزر في بعض الأحيان في وصف تقانات أخرى لاضوئية تتصف بصفاته، كإطلاق اسم الليزر الذري "atom laser" على منبع الذرات الموجودة في حالة مترابطة.

إن تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث للإشعاع هي آلية إصدار للإشعاع الكهرطيسي مدعومة بعملية إصدار محثوث. ويصدر ضوء الليزر نموذجياً في حزمة ضيقة ضعيفة التباعد مترابطة مكانياً، يمكن تداولها بعدسات. يدل مصطلح الضوء المترابط "coherent light" في تقانة الليزر الضوء الصادر على منبع ضوئي يولد (يصدر) أمواجاً منتظمة متطابقة في التواتر والطور والاستقطاب. وهذا ما يميز حزمة الليزر ذات الضوء المترابط من منابع الضوء التي تصدر حزماً ضوئية غير مترابطة يتغير طورها عشوائياً بدلالة الزمن والموضع. إن ضوء الليزر عموماً هو ضوء أحادي اللون monochromatic light ضيق الطيف الكهرطيسي حول أطواله الموجية؛ ولو أنه تتوافر الآن ليزرات تصدر في آن معاً أطوالاً موجية مختلفة.

9.1. المبدأ الأساسي لإصدار ضوء الليزر

9.1.1. الامتصاص والإصدار التلقائي

الامتصاص

يمكن للإلكترونات التي تدور حول نواة ذرة معينة أن تشغل مداريات مختلفة. مواقعها محددة تماماً. كما أن انتقال الإلكترون من مدار إلى آخر أكثر بعداً عن النواة يترافق مع تزايد الطاقة الداخلية للذرة، تقابل كل مدار طاقة محددة ومِنْ ثَمَّ حالة معينة للذرة، (الفصل2).

يطلق اسم الحالة الأساسية على الحالة التي توافق النهاية الصغرى للطاقة، أما الحالات الأخرى ذات الطاقات التي تزيد على الحالة الأساسية فيطلق عليها اسم الحالات المثارة. والانتقال من الحالة الأساسية إلى الحالة المثارة (أو من حالة مثارة إلى أخرى طاقتها أعلى) يتم بامتصاص للطاقة من خارج الذرة. يمكن أن تكون طاقة الإثارة هذه حركية (صدمات الجسيمات أو الذرات أو الجزيئات...) أو كهرطيسية. في هذه الحالة الأخيرة، تمتص الذرة الإشعاع الساقط عليها جزئياً أو كلياً. ومن المعروف أن الطاقة التي يحملها فوتون معين تعطى بالعلاقة $E = hf$، حيث f تواتر الإشعاع الكهرطيسي المرافق للفوتون، h، ثابت بلانك ويساوي $h = 6.62 \times 10^{-34}\, Joule \cdot S$.

يخضع امتصاص الذرة (أو الأيون أو الجزيء) للطاقة الكهرطيسية للعلاقة $E_2 - E_1 = hf$، حيث E_1 مستوى الطاقة الابتدائي في الذرة و E_2 $(E_2 > E_1)$ هو مستوى الطاقة الذي تنقل إليه بعد امتصاص الفوتون ذي التواتر f.

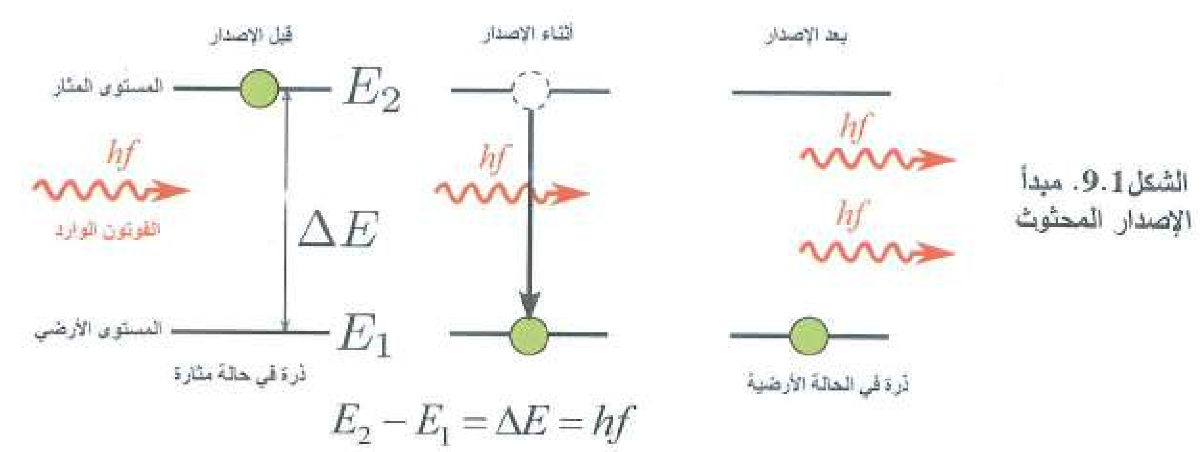
الإصدار التلقائي

يمكن للذرة المثارة أن تفقد تلقائياً الطاقة المكتسبة، وذلك بالسقوط إلى مستوى أخفض، وتتحول إلى طاقة حركية مثلاً من خلال الاصطدامات ومِنْ ثَمَّ تؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة. كما يمكن أن يؤدي فقدان الطاقة إلى إصدار إشعاع كهرطيسي يخضع إلى علاقة الامتصاص نفسها $\Delta E = hf$ حيث ΔE، يمثل الطاقة التي تفقدها الذرة و f تواتر الإشعاع الصادر. وهذا الإصدار التلقائي للإشعاع أو الفلورة لا يحدث في آن واحد لدى سائر المراكز المثارة. ويتناسب عدد الذرات التي تظل مثارة بعد مرور مدة معينة t طردياً مع $e^{-t/\tau}$، حيث τ، ثابت يتعلق بالذرة المثارة وبالمستوى وبالموجة الصادرة، ويطلق عليه اسم "عمر الحالة المثارة"، ويمكن أن يأخذ قيماً تمتد من الثانية إلى جزء من النانوثانية.

والإصدار التلقائي غير مترابط، فكل ذرة تصدر بشكل مستقل عن الذرات الأخرى، في أية لحظة وخلال مدة قصيرة جداً، وليس ثمة علاقة بين هذه الإصدارات من حيث الطور أو الاتجاه أو الاستقطاب، والإشعاع يصدر في جميع الاتجاهات، بتواتر ثابت يتحدد بالفاصل بين مستويي الطاقة اللذين يحدث الهبوط فيما بينهما، وتتغير قيمته قليلاً بمفعول دوبلر نتيجة للحركة العشوائية لمراكز الإصدار التي ترتبط بالتهييج الحراري، فيخضع الخط الطيفي في هذه الحالة إلى توسع (تعرّض دوبلر) يرتبط بشرطي درجة الحرارة والضغط.

الإصدار المحثوث للإشعاع

إن ظاهرة الإصدار المحثوث التي تنبأ بها آينشتاين نظرياً توافق، كما في حالة الإصدار التلقائي، تحرير فوتون من ذرة معينة مثارة لدى هبوطها إلى مستوى طاقي أخفض نتيجة لمرور فوتون آخر (الشكل 9.1).



الشكل 9.1. مبدأ الإصدار المحثوث

$$E_2 - E_1 = \Delta E = hf$$

يعطى تواتر الإشعاع أيضاً بالعلاقة $E_2 - E_1 = hf$، غير أن هذا الإشعاع لم يعد تلقائياً، وإنما يتحرض بوصول فوتون، طاقته تساوي الطاقة التي يمكن أن تتحرر من الذرة بعد هبوطها إلى المستوى الأخفض. وبتعبير آخر: يجب على الفوتون المحرِّض أن يكون له تواتر الفوتون الذي يحرض إصداره (الشكل 9.1).

E_2 E_1 (a) — E_2 E_1 (b)

الشكل 9.2. (a) توزع الذرات التوازني بين الحالة المثارة والحالة الأرضية بفعل التهيج الحراري (b) انقلاب توزع الذرات بطريقة معينة.

يتصف هذا الإصدار بخصائص مهمة: وهي أن الإشعاعات المحرِّضة والمتحرضة لها الطور نفسه والاتجاه نفسه والاستقطاب نفسه. وليس ثمة فارق فيزيائي ممكن بين الفوتون المحرض والفوتون المتحرض وما يحدث كما لو أن الضوء قد تضخم فعلاً بالإصدار المحثوث للإشعاع، وهذا هو تفسير المصطلح المنحوت " ليزر".

توجد شروط معينة كي يحدث ضمنها الإصدار المحثوث نتناولها الآن، توازي ما تنبأ به آينشتاين. لنفترض N ذرة ذات مستويين ممكنين للطاقة، N_1 ذرة في الحالة الأساسية E_1 و N_2 في الحالة المثارة E_2، حيث $E_2 > E_1$. وعند التوازن الحراري يخضع توزع هذه الذرات لقانون بولتزمان (الشكل 9.2a)

$$N_2/N_1 = \exp-(E_2 - E_1)/kT$$

حيث $k = 1.38\times10^{-23}\,Joule/\deg$ ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة للوسط المعتبر.

لنحسب مرتبة هذا التوزع بفرض أن $T = 300^{\circ}K$ وأن $E_2 - E_1 = hf$ يوافق الطول الموجي $1\mu m$ (في الإصدار أو الامتصاص)، أي $f = 3\times10^{14}\,Hz$ فنجد بسهولة أن:

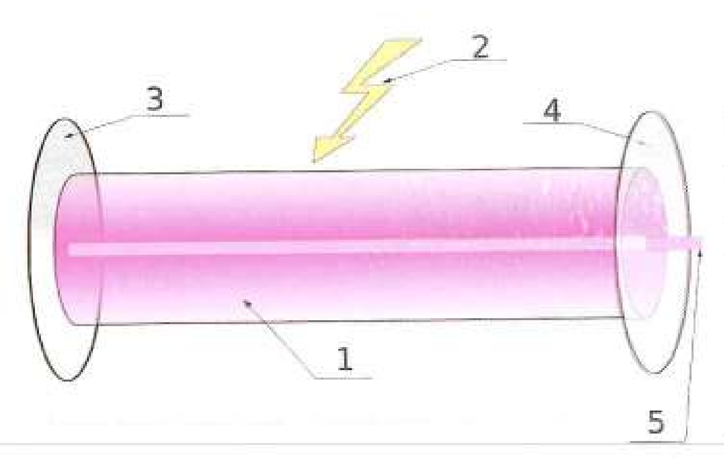
$$N_2/N_1 \approx e^{-48} = 1.4\times10^{-21}$$

أي لا توجد عملياً ذرات في الحالة المثارة في جسم في حالة توازن حراري عند درجة حرارة الوسط المحيط. وإن أي إشعاع وارد احتمال تحريضه للإصدار المحثوث قريب جداً من الصفر، لأن الإصدار

المحثوث يتناسب مع عدد الذرات في المستوي العلوي؛ واحتمال امتصاصه قريب جداً من الواحد؛ لأن الاحتمال يتناسب مع العدد في المستوى الأساسي. ولكي يكون احتمال حدوث أي من الأمرين مساوياً $\frac{1}{2}$، يتوجب أن يكون $N_2 = N_1$ ، ومِنْ ثَمّ يتوجب أن تكون درجة الحرارة عالية جداً. وللحصول على إصدار محثوث كبير يجب أن يكون $N_2 > N_1$ أي يجب أن يتحقق قلب التوزع الإسكاني population inversion، وهذا ما يمكن تحقيقه خارج مجال التوازن الحراري، في حالة إثارة خارجية يطلق عليها اسم "الضخ " pumping (الشكل9.2b).

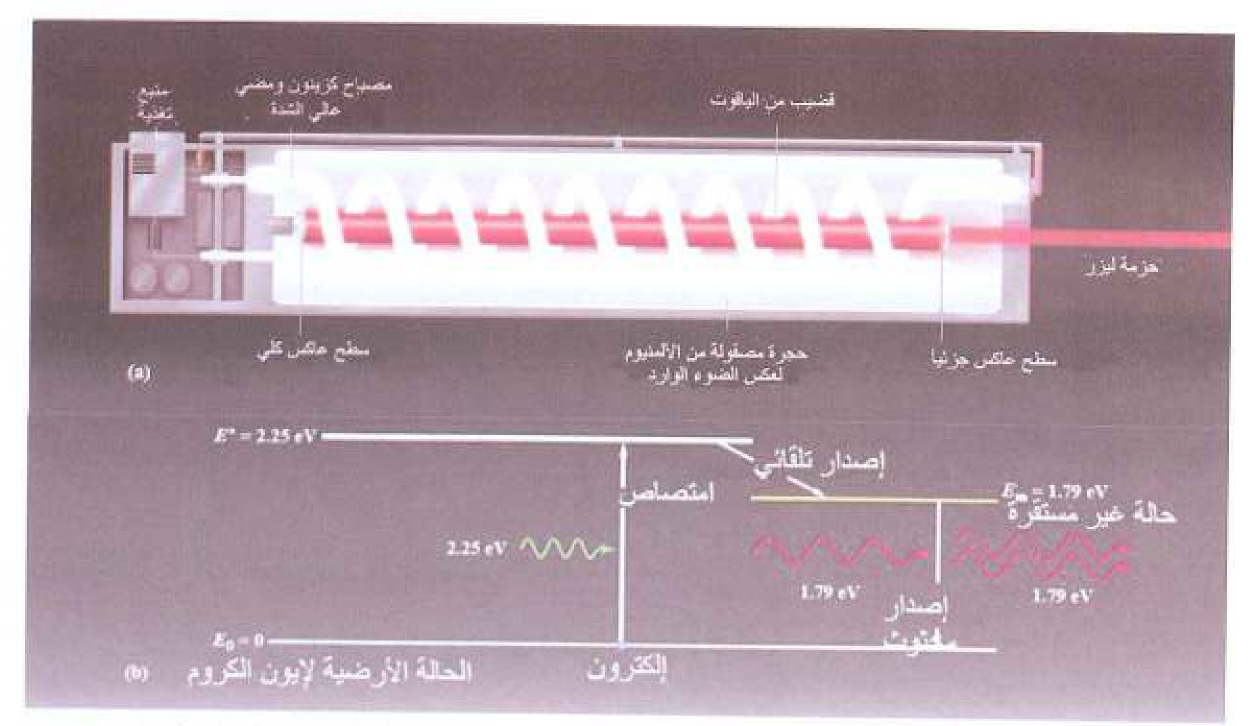
9.2.عناصر الليزر (الشكل9.3)

يتكون الليزر من وسط ربح Gain medium داخل تجويف ضوئي عالي الانعكاسية ومن وسيلة لتوليد وسط الربح بالطاقة Laser pumping energy. وأما وسط الربح فهو مادة تسمح خصائصها بتضخيم الضوء بالإصدار المحثوث. يتكون التجويف في أبسط أشكاله من مرآتين مرتبتين بحيث يمكن للضوء أن يرتد عنهما ذهاباً وإياباً، عابراً في كل مرة وسط الربح. تكون إحدى المرآتين عالية الانعكاسية High reflector، في حين تكون الأخرى (قارن الخرج Output coupler) في الحالة النموذجية شفافة جزئياً، تصدر منها حزمة ليزر الخرج. عندما يمر الضوء الذي يتميز بطول موجي معين من وسط الربح يتضخم (أي تزداد استطاعته)؛ إذْ تكفل المرآتان اللتان تحيطان بالوسط الفعال مرور معظم الضوء في وسط الربح عدداً كبيراً من المرات، حيث يتضخم بشكل متكرر. في حين أن جزءاً من الضوء بين المرآتين (أي في التجويف) يعبر خلال المرآة الشفافة جزئياً، ويغادرها على شكل حزمة ضوئية Laser beam.



الشكل9.3. 1) وسط الربح، 2) طاقة ضخ الليزر، 3) عاكس شديد ، 4) قارن الخرج ، 5) حزمة الليزر.

تدعى عملية تزويد الطاقة اللازمة للتضخيم "الضخ " pumping. يجري تزويد الطاقة إما على شكل تيار كهربائي وإمّا في الحالة النموذجية، حالة إثبات المبدأ، على شكل ضوء بأطوال موجية مختلفة (الشكل9.4). يمكن تزويد هذا الضوء بمصباح وميضي flash lamp أو ربما بليزر آخر. تحوي معظم الليزرات العملية عناصر إضافية تؤثر في خصائصها كالطول الموجي الصادر وشكل الحزمة.



الشكل9.4. (a) ليزر ياقوتي، (b) مخطط المستويات الطاقية في ليزر الياقوت. يحدث الضخ الضوئي لدى امتصاص إيون الكروم للفوتونات2.25eV الواردة إلى بلورة الياقوت، ليصبح في إحدى الحالات المثارة *E. يمكن للإيون أن يسترخي في هذه الحالة إلى الحالة غير المستقرة E_m. يؤدي مرور فوتون طاقته 1.79eV بإيون الكروم وهو في هذه الحالة إلى تحريضه على إصدار فوتون مماثل1.79eV.

إن وسط الربح في ليزر معين هو مادة يمكن التحكم بنقاوتها وأبعادها وتركيزها وشكلها، يعتمد تضخيم الحزمة بعملية الإصدار المحثوث على الذرات أو الجزيئات الفعالة ليزرياً فقط. يمكن أن تكون هذه المادة غازية أو سائلة أو صلبة أو بلازما. يمتص وسط الربح طاقة المضخة التي ترفع بعض الإلكترونات إلى حالات كمومية طاقاتها أعلى (مثارة). يمكن للإلكترونات أن تتفاعل مع الضوء بامتصاص الفوتونات وإصدارها على السواء. يمكن للإصدار أن يكون تلقائياً أو محثوثاً. وعندما يتجاوز عدد الإلكترونات الموجودة في الحالة المثارة عدد الإلكترونات الموجودة في الحالة الطاقية الأخفض، يتم الوصول إلى الانقلاب الإسكاني، ويكون مقدار الإصدار المحثوث العائد للضوء المار أكبر من مقدار الامتصاص. إن الضوء المتولد بالإصدار المحثوث يشبه كثيراً إشارة الدخل من حيث الطول الموجي والطور والاستقطاب. الأمر الذي يضفي على ضوء الليزر خاصة الترابط، ويسمح له بالإبقاء على تجانسية استقطابه، وغالباً على وحدانية اللون التي ترسخ من خلال تصميم التجويف الضوئي.

إن وسط الربح يضخم أي فوتونات تمر به بصرف النظر عن اتجاهها، ولكن الفوتونات المسددة وفقاً للتجويف تمر أكثر من مرة خلال الوسط ومِنْ ثَمَّ يكون تضخيمها كبيراً. تكون حزمة الليزر الصادرة ضعيفة التباعد في معظم الأحيان، يمكن جعلها متوازية بعدسة.

9.3. أنماط تشغيل الليزر

يمكن لخرج الليزر أن يكون خرجاً ثابت السعة ومستمراً يعرف بالموجة المستمرة continuous wave (أوCW) أو أن يكون نبضياً باستخدام تقنيات القطع والوصل Q-switching أو بقفل الأنماط modelocking أو القطع والوصل الربحي gain-switching. يمكن في التشغيل النبضي بلوغ استطاعات ذروية أعلى بكثير من الاستطاعات المستمرة. يمكن لبعض أنواع الليزرات كالليزرات الصباغية أن تولد الضوء في مجال واسع من الأطوال الموجية؛ إن هذه الخاصة تجعلها مناسبة لتوليد النبضات الضوئية الفائقة القصر، من مرتبة بضع فمتوثانيات (10^{-15} s).

9.3.1. تشغيل الليزر وفق النظام المستمر

إن خرج الليزر في نمط التشغيل بالموجة المستمرة ثابت نسبياً بالنسبة للزمن. حيث يتم الإبقاء على الانقلاب الإسكاني اللازم لعملية الليزرة باستمرار بمنبع ضخ ثابت.

9.3.2. تشغيل الليزر وفق النظام النبضي

يتغير خرج الليزر في نمط التشغيل النبضي مع الزمن آخذاً في الحالة النموذجية شكل أدوار متناوبة بين 'on' و 'off'. يهدف المرء في كثير من التطبيقات إلى توضيع أكبر قدر من الطاقة في مكان معين وفي أقصر زمن ممكن. يمكن مثلاً في الاستئصال الليزري laser ablation تبخير حجم صغير من مادة الجسم الذي يتعرض لليزر، إذا حصل على الطاقة اللازمة ليسخن إلى حد كاف خلال مدة قصيرة جداً. غير أنّه إذا امتدت الطاقة على مدة زمنية أطول يمكن أن يكون لدى الحرارة متسع من الوقت كي تنتشر في حجم العينة، وعدم بلوغ درجة كافية من الحرارة في تلك النقطة كي تتبخر. وهناك عدد من الطرائق لتحقيق ذلك.

9.3.3. نمط التشغيل وفق مرتبة الميلي ثانية Q-switching

يسمح للانقلاب الإسكاني (الذي يحدث بالطريقة نفسها في حالة الموجة المستمرة) في ليزر Q-switched laser، بالتراكم بجعل شروط التجويف (الـ Q) غير مشجعة لعملية الليزرة lasing لمدة زمنية معينة. وعندما تصبح طاقة الضخ المختزنة في الوسط الليزري، عند المستوى المطلوب، يتم التحكم بالـ 'Q' (كهربصرياً electro optic أو صوتوبصرياًacousto optic) للحصول على شروط مشجعة فتتحرر النبضة. الأمر الذي يؤدي إلى استطاعات ذروية عالية حيث تتراكم الاستطاعة الوسطية لليزر في إطار زمني أقصر. يعتمد التشغيل وفق هذا النمط على خواص القاطعة Q وسرعة استجابتها التي تكون من مرتبة الميليثانية أو أصغر قليلاً.

9.3.4. التشغيل وفق مرتبة الفمتوثانية: قفل الأنماط Modelocking

تستفيد هذه التقنية من وجود عرض محدود لطيف الليزر مع ضيقه يعينه وسط الربح، ومن وجود أنماط ممكنة مختلفة يعينها التجويف المجاوب الليزري، فإذا جعل فرق الطور بين الأنماط المختلفة ثابتاً (وهذا قفل النمط) تتداخل هذه الأنماط ليصدر ليزر الأنماط المقفلة نبضات قصيرة للغاية من مرتبة عشرات البيكوثانيات إلى أقل من عشر فمتوثانيات. يفصل بين هذه النبضات الزمن الذي تستغرقه النبضة لتستكمل دورتها في تجويف المجاوب. تتميز النبضات القصيرة زمنياً وفقاً لحدّ نظرية فوربيه Fourier limit (والتي تعرف أيضاً بمبدأ الشك الطاقة–الزمن)، بطيف واسع من الأطوال الموجية، مما يترتب على وسط الربح أن يتمتع بعصابة ربح عريضة إلى حد كاف لتضخيم تلك التواترات. من المواد المناسبة لإصدار النبضات القصيرة مثلاً الياقوت الاصطناعي المشوب بالتيتانيوم (Ti:sapphire).

يعد الليزر المقفل الأنماط من الأدوات المتعددة الأغراض في البحث عن العمليات التي تحدث خلال سلالم زمنية قصيرة للغاية، وتعرف أيضاً بفيزياء الفمتوثانية، وكيمياء الفمتوثانية والعلوم الفائقة السرعة، ولجعل مفعول اللاخطية في المعدات البصرية أعظم ما يمكن (كتوليد المدروج الثاني و parametric down-conversion و optical parametric oscillators وما شابه ذلك)، وفي تطبيقات القطع الضوئي. يمكن لهذه الليزرات أيضاً أن تبلغ بسبب تدخل السلالم الزمنية القصيرة، استطاعات عالية للغاية.

9.3.5. الضخ النبضي Pulsed pumping

ثمة طريقة أخرى لتشغيل ليزر نبضي تكمن في ضخ الوسط الليزري بمنبع هو نفسه نبضي، إما من خلال الشحن الإلكتروني في حالة المصابيح الومضية، وإمّا بليزر آخر هو أصلاً نبضي. استخدم الضخ النبضي تاريخياً في الليزرات الصباغية dye lasers حيث يكون عمر الإسكان الانقلابي في الجزيء الصباغي من القصر بحيث يحتاج لمضخة سريعة عالية الطاقة. وقد كانت تكمن طريقة التغلب على هذه المشكلة بتغيير المكثفات الكبيرة التي تبدل لتتفرغ في المصابيح الوميضية مولدة ومضة ضخ واسعة الطيف. يلزم الضخ النبضي أيضاً في الليزرات التي يضطرب فيها وسط الربح كثيراً في أثناء عملية الليزرة لدرجة تستدعي توقف هذه الأخيرة لفترة قصيرة. لا يمكن تشغيل هذه الليزرات كليزر الإكسايمر وليزر بخار النحاس في نمط الموجة المستمرة على الإطلاق.

9.4. أنواع الليزر

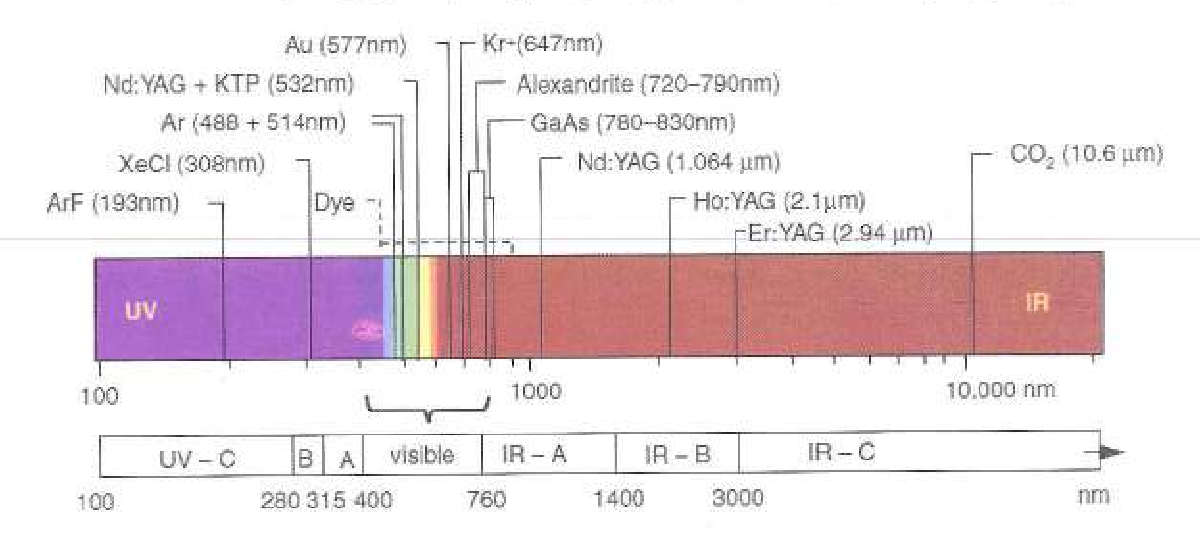
يبين الشكل9.5 الخرج الطيفي وتمركزه حول أطوال موجية مميزة لعدة أنواع من الليزر .

9.4.1. الليزرات الغازية

يختلف مجال إصدار الليزرات الغازية باختلاف الغاز المستعمل ومزائج الغازات المستعملة. فقد تم بناء الكثير من الليزرات الغازية واستخدمت لأغراض متعددة.

9.4.1.1. يصدر **ليزر الهليوم-نيون** helium-neon laser (HeNe) عند عدد كبير من الأطوال الموجية. والليزرات التي تعمل عند الطول الموجي 633 nm كثيرة الشيوع في التربية لانخفاض تكلفتها. وهذا الطول الموجي أشد خطوطها غير أن مردودها منخفض أقل من 1%.

9.4.1.2. ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون Carbon dioxide lasers. تستطيع ليزرات غاز ثاني أكسيد الكربون أن تصدر مئات الكيلوواط عند الطولين الموجيين 9.6 µm و 10.6 µm وغالباً ما تستخدم في الصناعة في القطع وفي اللحام. يزيد مردود ليزر غاز ثاني أكسيد الكربون على 10%.



الشكل9.5. الأطوال الموجية لأنواع الليزر الطبية. تظهر في الشكل أنواع الليزر بخطوطها المميزة أعلى محور الأطوال الموجية، فيما تظهر في أسفل المحور أنواع الليزر التي يمكنها أن تصدر في مجال من الأطوال الموجية.

9.4.1.3. تصدر **ليزرات الأرغون الإيوني** في المجال 351-528.7 nm، ولو أن أكثر الخطوط شيوعاً 458 nm و 488 nm و 514.5 nm.

9.4.1.4. وليزر النتروجين بالانفراغ الكهربائي العرضاني والغاز في الضغط الجوي TEA، ليزر غازي رخيص الثمن، ويولد الضوء فوق البنفسجي عند الطول الموجي 337.1 nm.

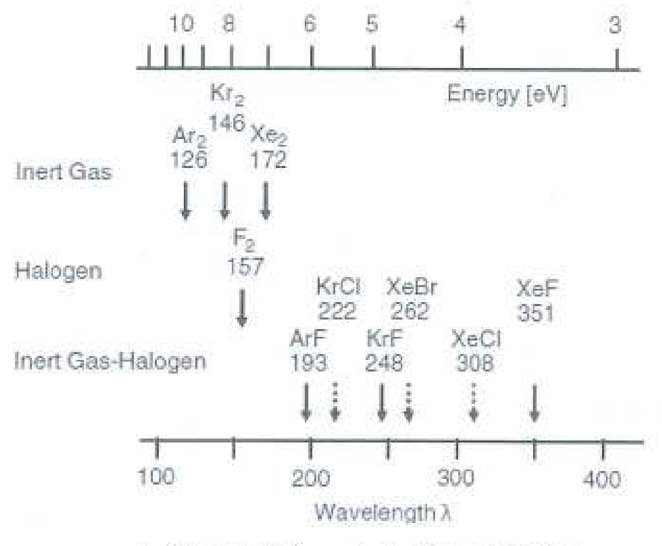
9.4.1.5. ليزرات الأيونات المعدنية ليزرات غازية تولد الأطوال الموجية فوق البنفسجية البعيدة.

9.4.1.5. ليزر الإكسايمر

إن ليزر الإكسايمر excimer laser (ويدعى أحياناً ليزر الإكسيبليكس exciplex laser وهو الأصح) هو أحد أشكال الليزرات فوق البنفسجية يشيع استخدامه في جراحة العين. ومصطلح الإكسايمر منحوت

من 'excited dimer'، في حين أن مصطلح الإكسيبليكس منحوت من 'excited complex'. وليزر الإكسايمر يجمع في الحالة النموذجية بين غاز خامل (كالأرغون أو الكريبتون أو الكزينون) وغاز فعال (كالفلور أو الكلور). يتم ضمن شروط التحفيز الكهربائية المناسبة إحداث جزيء كاذب يدعى إكسايمر (وفي حالة هاليدات الغازات النادرة يدعى إكسبليكس) لا يمكن أن يوجد إلاّ في حالة طاقية مثارة، ويمكن أن يعطي ضوءاً ليزرياً في المجال فوق البنفسجي.

إن المادة الحية والمركبات العضوية تمتص الضوء فوق البنفسجي الصادر من ليزر الإكسايمر بشكل جيد. يضيف ليزر الإكسايمر طاقة كافية للتداخل مع الروابط الجزيئية في النسيج السطحي الذي يتفكك بنجاح في الهواء بأسلوب فائق الإحكام من خلال ما يدعى الاستئصال الضوئي laser ablation وليس الحرق. وهكذا تمتاز ليزرات الإكسايمر بأنها يمكن أن تزيل طبقات دقيقة من سطح المادة من دون تسخين أو تغيير لباقي المادة الذي يظل سليماً. من شأن هذه الخصائص أن تجعل ليزر الإكسايمر مناسباً جداً في مكننة المواد العضوية المكروية بدقة precision micromachining organic material (بما فيها بعض البوليميرات والمواد البلاستيكية)، أو في العمليات الجراحية المعقدة كالليزك LASIK في جراحة العين.



الشكل 9.6. الأطوال الموجية لليزرات الأكسايمر.

يعتمد الطول الموجي لليزر الإكسايمر على الجزيئات المستخدمة، ويقع عادة ضمن المجال فوق البنفسجي (الشكل 9.6).

يتم تشغيل ليزرات الإكسايمر عادة بمعدل نبضي قدره نحو 100 Hz وطول نبضة قدره 10 ns~، ولو أن بعضها يعمل بمعدل يصل إلى 8 kHz وبطول 200 ns.

إن خرج ليزرات الإكسايمر فوق البنفسجي العالي الاستطاعة يجعلها مفيدة في الجراحة (وخاصة جراحة العين بالليزك LASIK) وفي الحفر الحجري في تصنيع أنصاف النواقل وفي المعالجة الجلدية. يتم امتصاص ضوء الليزر في الحالة النموذجية في أول جزء من مليار جزء من المتر (نانومتر) من النسيج. إن ليزر الإكسايمر دقيق للغاية. يمكنه تبئير حزمته في منطقة بصغر 0.25 micrometres ويمكنه في كل مرة إزالة ثخانة بقدر 0.5% من عرض شعرة بشرية.

9.4.2. ليزرات الحالة الصلبة

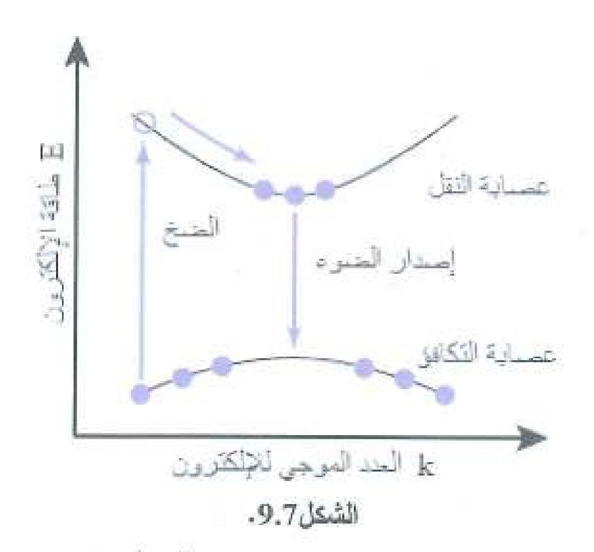
تستخدم ليزرات الحالة الصلبة Solid-state lasers قضيباً بلورياً أو من الزجاج مشوباً بإيونات أوساط ربح توفر الحالات الطاقية المطلوبة. أول ليزر تم تصنيعه مثلاً كان ليزر الياقوت المحضر من الياقوت (أكسيد الألمنيوم corundum المشوب بالكروم). يتم عملياً الإبقاء على الانقلاب الإسكاني في الذرات الشائبة. تضخ هذه المواد باستخدام طول موجي أقصر منه في حالة طول موجة الليزرة، غالباً من أنبوب ومضي، أو من ليزر آخر. يشيع استخدام النيوديوم في مختلف بلورات الحالة الصلبة بما فيها أورتو فانادات الإيتريوم المشوبة بالنيوديوم yttrium orthovanadate (Nd:YVO4) وفلوريد الليتيوم والإيتريوم المشوب بالنيوديوم (Nd:YLF) وعقيق الإتريوم والألمنيوم المشوب بالنيوديوم (Nd:YAG). يمكن لجميع هذه الليزرات أن تولد استطاعات عالية في المجال تحت الأحمر من طيف الإشعاعات الكهرطيسية عند الطول الموجي 1064 nm. وهي تستخدم في القطع واللحام والرسم على المعادن والمواد الأخرى، وفي المطيافية أيضاً وفي ضخ الليزرات الصباغية. كما تضاعف تواترات هذه الليزرات أو تثالث أو تزابع لتوليد حزم (الأخضر المرئي) 532 nm و(وفوق البنفسجي) 355 nm و 266 nm على الترتيب. تستخدم ليزرات الحالة الصلبة المضاعفة التواتر التي تضخ بالديود في صنع مؤشرات ليزرية باللون الأخضر.

يولد الياقوت المشوب بالتيتانيوم ليزراً قابلاً للتوليف ضمن مجال واسع من تحت الأحمر، يشيع استخدامه في المطيافية. كما اشتهر أيضاً لاستخدامه كليزر أنماط مقفلة، يولد نبضات فائقة القصر، استطاعاتها الذروية عالية للغاية.

9.4.3. الليزرات نصف الناقلة

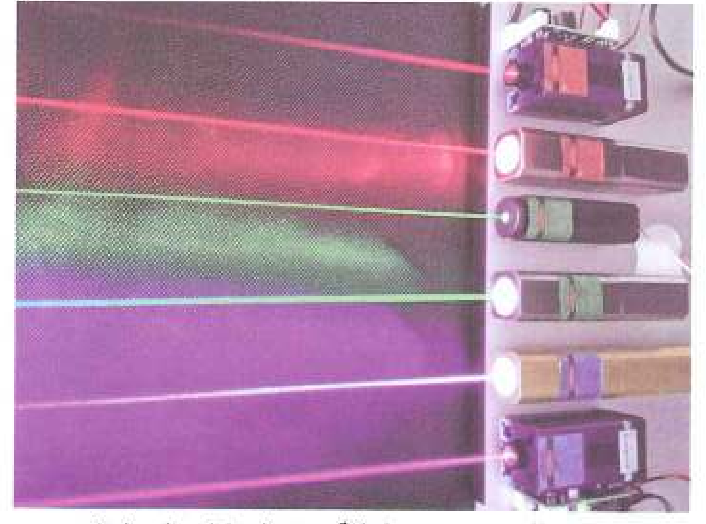
الليزرات نصف الناقلة هي ليزرات حالة صلبة، ولكنها تتميز بنمط تشغيل مختلف. تعتمد الليزرات نصف الناقلة على أوساط ربح نصف ناقلة، في حين يحدث الربح الضوئي عادة بالإصدار المحثوث بالانتقال من عصابة النقل إلى عصابة التكافؤ لدى وجود كثافة عالية من حاملات الشحنة المتحركة في عصابة النقل. يوضح الشكل9.7 المنشأ الفيزيائي للربح في نصف الناقل (الانتقال بين عصابتي النقل والتكافؤ في أغلب الأحيان). حيث يكون معظم الإلكترونات قبل الضخ في عصابة التكافؤ.

يمكن لحزمة ضخ طاقتها أعلى قليلاً من طاقة العصابة الممنوعة bandgap energy (الفارق الطاقي بين عصابتي النقل والتكافؤ) أن تثير الإلكترونات نحو حالة أعلى في عصابة النقل، حيث سرعان ما تتحلل إلى حالات بالقرب من قاع عصابة النقل. وفي الوقت نفسه تتولد الثقوب (الفراغات) في عصابة التكافؤ وتنتقل إلى أعلى عصابة التكافؤ. يمكن للإلكترونات في عصابة النقل أن تتحد في هذه الحالة مع الثقوب، مصدرة فوتونات بطاقة تساوي تقريباً العصابة الممنوعة. يمكن تحريض مثل هذه العملية أيضاً بفوتونات ترد بطاقة مناسبة.



الشكل9.7.

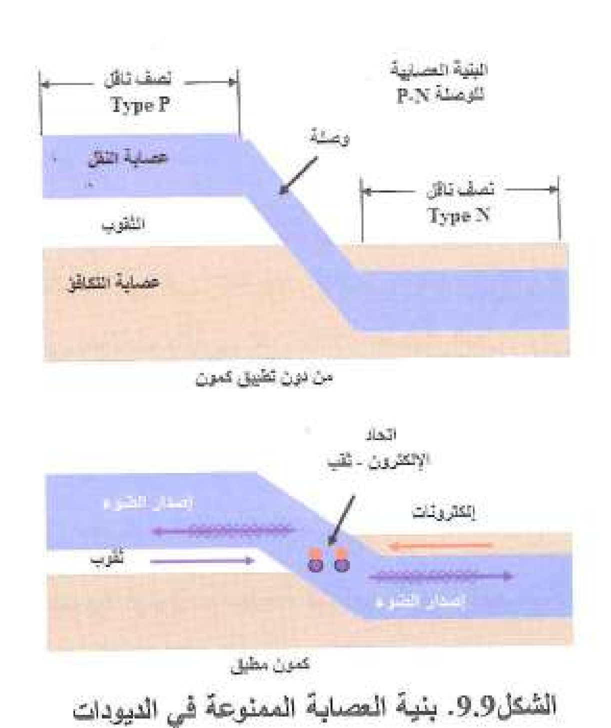
بينما يعمل معظم الليزرات نصف الناقلة الشائعة في مجال تحت الأحمر القريب من الطيف، فإن البعض الآخر يولد الضوء الأحمر (كالمؤشرات الليزرية التي تعتمد على GaInP أو اللون الأزرق أو البنفسجي (بنتريدات الغاليوم). وفي حال إصدار تحت الأحمر المتوسط توجد ليزرات سلينيد الرصاص PbSe وليزرات الشلال الكمومي (ليزر أمواج التيراهرتز). والديود (الثنائي) الليزري A laser diode (LD) (الشكل 9.8) ليزر نصف ناقل يضخ كهربائياً يتكون الوسط الفعال فيه من وصلة بين نوعين لنصف الناقل أحدهما مشوب بشائبة مانحة للإلكترونات N والآخر مشوب بشائبة آخذة للإلكترونات P، تُصْدِر الضوء من خلال اتحاد الإلكترونات مع الثقوب.



الشكل9.8. الليزرات نصف الناقلة ومن البرتقالي إلى البنفسجي 660 nm و635 nm و532 nm و520 nm و445 nm و 405 nm على الترتيب.

تستخدم الديودات الليزرية في العديد من المجالات منها: المطيافية وفي ضخ ليزرات الحالة الصلبة وفي أنواع مختلفة للمعالجة الطبية.

يعتمد إصدار الليزرات الديودية (الشكل9.9) التجارية بأطوال موجية من 375 nm إلى 1800 nm، على التحكم بعرض العصابة الممنوعة مع التحكم بالكمون المطبق. وقد شهدت هذه الليزرات إصدار أطوال موجية تزيد على 3µm. تستخدم الديودات الليزرية المنخفضة الاستطاعة في الطابعات الليزرية وسواقات CD/DVD. وغالباً ما تستخدم الديودات الليزرية ذات الاستطاعة الأعلى في الضخ الضوئي لليزرات أخرى عالية المردود. يمكن لبعض هذه الليزرات أن تولد خروجاً عالية الاستطاعة، وإشعاعاً طوله الموجي قابل للتوليف وضيق عرض الخط أو نبضات ليزرية فائقة القصر.



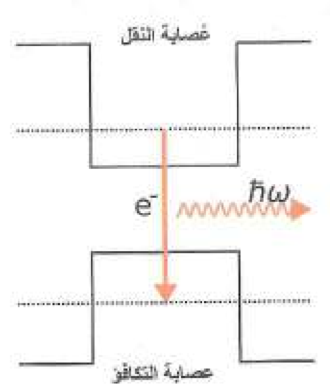
الشكل9.9. بنية العصابة الممنوعة في الديودات الليزرية.

9.4.4. ليزرات الشلال الكمومي

ليزرات الشلال الكمومي Quantum cascade lasers (QCLs) هي ليزرات نصف ناقلة، يحدث فيها انتقال فعال active transition لإلكترون بين عصابات جزئية للطاقة في بنية تحوي عدة آبار كمومية، تصدر في المجال تحت الأحمر المتوسط والبعيد من طيف الإشعاعات الكهرطيسية (أمواج التيراهرتز).

خلافاً لليزرات نصف الناقلة بين العصابية النموذجية التي تصدر الإشعاع الكهرطيسي من خلال اتحاد أزواج الإلكترونات–الثقوب في العصابة الممنوعة لنصف الناقل، فإن QCLs أحادية القطبية (إما ثقوب وإمّا إلكترونات) ويتم تحقيق الإصدار الليزري من خلال استخدام الانتقالات بين العصابات الجزئية intersubband transitions في كداسة متكررة من بنيات الآبار الكمومية غير المتجانسة quantum well heterostructures المضاعفة نصف الناقلة.

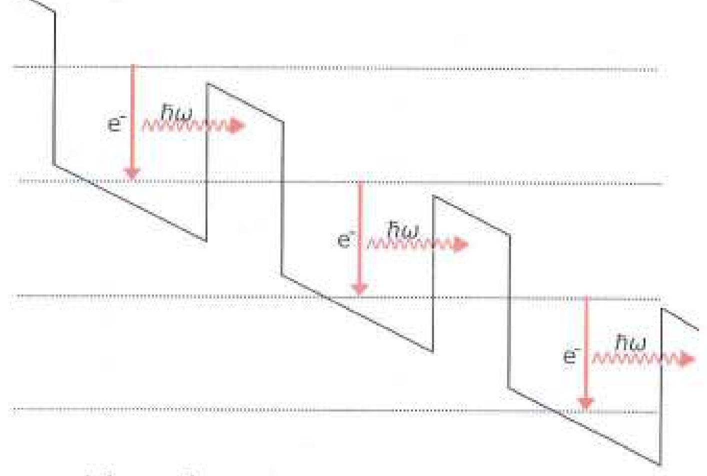
خلافاً لما يحدث في حالة أنصاف النواقل الجرمية حيث تتحكم العصابة الممنوعة باتحاد الإلكترونات والثقوب، فإن الـ QCL لا يعتمد عرض العصابة الممنوعة للمواد نصف الناقلة الجرمية في منطقته الفعالة ضوئياً (الشكل9.10a) بل يعتمد عوضاً عن ذلك سلسلة دورية من الطبقات الرقيقة المتغيرة التركيب المادي، أي متغيرة النسب من مواد مختلفة لتشكل شبكة فائقة superlattice منها (الشكل9.10b). تدخل الشبكة الفائقة كموناً كهربائياً متغيراً على



الشكل9.10a. الانتقالات بين العصابية

طول الأداة، يعني أنه يوجد احتمالية متغيرة؛ لأن تشغل الإلكترونات **في ليزرات نصف ناقلة تقليدية تصدر** مواقع مختلفة على طول الأداة. يطلق على هذا الأمر "الاحتباس في **فوتوناً وحيداً.** الآبار الكمومية المضاعفة الأحادية البعد" quantum confinement، ويؤدي إلى انشطار عصابة الطاقات المسموحة إلى عدد من العصابات الإلكترونية الجزئية المنفصلة. وبتصميم الطبقات بالثخانة الملائمة، يمكن بناء انقلاب إسكاني بين عصابتين جزئيتين في الجملة يلزم لتحقيق الإصدار الليزري. ولما كان موقع المستويات الطاقية يتحدد بشكل رئيسي بثخانة الطبقة وليس المادة، فإنه يمكن توليف طول موجة إصدار الـ QCLs على مجال واسع في جملة المواد نفسها.

تخضع الإلكترونات في بنيات الشلال الكمومي إلى انتقالات بين عصابات جزئية وتصدر الفوتونات. تنتقل الإلكترونات إلى الدور التالي في البنية بالعبور النفقي وتتكرر العملية.



الشكل9.10b. الانتقالات بين العصابات الإلكترونية الجزئية في ليزر الشلال الكمومي

أضف إلى ذلك أنه ينتفي وجود الإلكترونات والثقوب بعد اتحادها في العصابة الممنوعة، ولن تؤدي أي دور آخر في توليد الفوتونات.

غير أنه في الـ QCLs الأحادية القطبية، مجرد خضع إلكترون لانتقال بين عصابتين جزئيتين يصدر فوتون في دور واحد من الشبكة الفائقة، يمكنه العبور النفقي إلى الدور التالي في البنية حيث يمكن إصدار فوتون آخر.

إن عملية إلكترون واحد يسبب إصدار العديد من الفوتونات لدى عبوره بنية الـ QCLs تعطي اسم الشلال، وتجعل المردود الكمومي الذي يزيد على الوحدة، مما يؤدي إلى استطاعات خرج أعلى منها في حالة الديودات الليزرية. تغطي **أطوال موجة الإصدار.** في الـ QCLs حالياً مجال الأطوال الموجية الذي يمتد من 2.75–250 µm (ويصل حتى 355µm بتطبيق حقل مغنطيسي).

تطبيقات ليزر الشلال الكمومي

تم تسويق ليزرات الشلال الكمومي Distributed feedback (DFB) أوّلَ مرة في عام 2004، وتم تسويق ليزرات الشلال الكمومي ذات التجويف الخارجي التي يمكن توليفها على نطاق واسع أوّلَ مرة في عام 2006. إن كلاً من ارتفاع خرج استطاعة QCLs الضوئية ومجال توليفه وتشغيلها في درجة حرارة

الغرفة يجعلها مفيدة في تطبيقات المطيافية والاستشعار عن بعد للغازات البيئية والملوثات في الغلاف الجوي وفي أمان البلاد، وفي التشخيص الطبي كمحللات للنفس. تستخدم QCLs أيضاً في دراسة كيمياء البلازما. كما يمكن أن تؤدي دوراً مهماً في مطيافية التيراهرتز في التعرف على الجزيئات الثقيلة المعقدة وتكميتها كالمواد الكيميائية السامة والمتفجرات والأدوية.

9.4.5. الليزرات الصباغية

تستخدم الليزرات الصباغية Dye lasers صباغاً عضوياً كوسط ربح. إذْ يسمح اتساع طيف ربح الأصبغة المتوافرة لهذه الليزرات بأن تكون قابلة للتوليف على نطاق واسع، أو أن تولد نبضات قصيرة جداً (من مرتبة بضع فمتوثانيات).

إن الليزر الصباغي dye laser هو ليزر يستخدم صباغاً عضوياً كوسط لليزرة lasing medium على شكل محلول سائل عادة. يمكن استخدام الصباغ عادة لمجال من الأطوال الموجية أوسع بكثير منه في الغازات ومعظم أوساط ليزرة الحالة الصلبة. إذْ يجعلها اتساع عرض عصابتها مناسبة بشكل خاص كليزرات قابلة للتوليف وليزرات نبضية. أضف إلى ذلك لأنه يمكن استبدال الصباغ بنوع آخر لتوليد مختلف الأطوال الموجية بالليزر نفسه، ولو أن هذا الأمر يتطلب عادة استبدال مكونات ضوئية أخرى في الليزر أيضاً.

إن الأصبغة المستخدمة في هذه الليزرات تحوي بالأحرى جزيئات عضوية كبيرة تتفلور. من شأن الضوء الوارد أن يثير الجزيئات الصباغية إلى الحالة التي تغدو فيها جاهزة لإصدار الإشعاع المحثوث، وهي الحالة المفردة singlet state. في هذه الحالة تصدر الجزيئات الضوء عن طريق الفلورة fluorescence، ويكون الصباغ شفافاً لطول موجة الليزرة. تنتقل الجزيئات خلال مكروثانية فما دون إلى حالتها الثلاثية triplet state. في الحالة الثلاثية يصدر الضوء عن طريق الفسفرة phosphorescence، وتمتص الجزيئات طول موجة الفسفرة، فيصبح الصباغ عاتماً. تتميز الأصبغة السائلة أيضاً بعتبة ليزرة مرتفعة جداً. تحتاج الليزرات التي تضخ بالمصابيح الومضية ومضات مدتها قصيرة جداً، لتسوق مقادير كبيرة جداً من الطاقة الضرورية لتجعل الصباغ يتجاوز عتبة الليزرة قبل أن يتغلب امتصاص الحالة الثلاثية على إصدار الحالة المفردة. يمكن لليزرات الصباغية التي تضخ بليزر خارجي أن توجه طاقة كافية من الطول الموجي المناسب نحو الصباغ بمقدار صغير نسبياً من طاقة الدخل، ولكن يترتب على الصباغ أن يسري بسرعات عالية لجعل جزيئات الحالة الثلاثية في منأى عن مسار الحزمة فيمنع امتصاصها له.

تفيد هذه الليزرات في عدة مجالات في **طب الليزر**، منها الجلدية، حيث تستخدم في جعل طبيعة الجلد أكثر نعومة. تسمح إمكانية اتساع مجال أطوالها الموجية بمواءمتها بدقة مع خطوط امتصاص بعض

النسج، كالميلانين أو الهموغوبين، بينما يساعد ضيق العصابات التي يمكن الحصول عليها في تخفيض إمكانية إلحاق الضرر بالنسيج المحيط. وهي تستخدم في معالجة الوحمات الوعائية port-wine stains، واضطرابات الأوعية الدموية الأخرى، والندبات وحصى الكلية. يمكن توليفها أيضاً مع تشكيلة من الأحبار لإزالة الوشوم بالإضافة إلى عدد من التطبيقات.

في **المطيافية** يمكن استخدم الليزرات الصباغية في دراسة أطياف امتصاص وإصدار مختلف المواد. إذْ يسمح كل من قابليتها للتوليف (من تحت الأحمر القريب إلى البنفسجي القريب) وضيق عرض عصابتها وارتفاع شدتها بتنوع أكبر بكثير منه في حالة المنابع الضوئية الأخرى. إن تنوع عروض النبضات من النبضات الفائقة القصر الفمتوثانية إلى التشغيل بنمط الموجة المستمرة يجعلها ملائمة لمجال واسع من التطبيقات، من دراسة أعمار الفلورة للجزيئات الصيدلانية إلى خصائص أنصاف النواقل إلى تجارب مجالات الليزر القمرية.

9.4.6. ليزر الإلكترونات الحرة

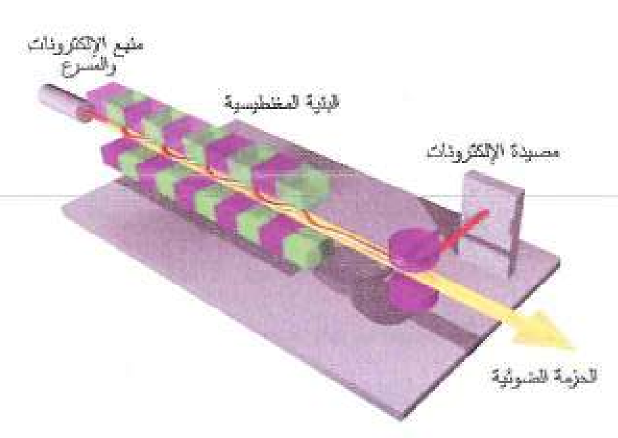
يولد ليزر الإلكترونات الحرة Free electron laser أو FELs إشعاعاً مترابطاً عالي الاستطاعة، يمكن توليفه على مجال واسع من الأطوال الموجية، يمتد من الأمواج المكروية microwaves مروراً بإشعاع التيراهرتز وتحت الأحمر، إلى الطيف المرئي إلى الأشعة السينية اللينة. لهذه الليزرات أعرض مجال تواتري من أي نوع ليزر آخر. بينما تشترك ليزرات الإلكترونات الحرة مع الليزرات الأخرى بالملامح الضوئية نفسها، كالإشعاع المترابط، فإن آلية توليد ليزر الإلكترونات الحرة مختلفة تماماً. فهي خلافاً لليزرات الغازية أو السائلة أو الصلبة التي تعتمد على الحالات الذرية أو الجزيئية المرتبطة، تستخدم ليزرات الإلكترونات الحرة حزمة إلكترونية نسبوية، ومن هنا جاء مصطلح الإلكترونات الحرة. ففي حين تصدر الإلكترونات (والشحنات المتسارعة عموماً) أمواجاً كهرطيسية عريضة الطيف غير مترابطة عندما تكون سرعها منخفضة نسبياً، يصبح هذا الطيف ضيقاً جداً ومترابطاً عندما تقترب سرعة الإلكترونات من سرعة الضوء، فتصبح محكومة بالإلكتروديناميك النسبوي.

9.4.6.1. توليد الحزمة

لتوليد ليزر الإلكترونات الحرة، يتم تسريع حزمة من الإلكترونات إلى سرعات نسبوية. إذْ تمرر هذه الحزمة في حقل مغنطيسي عرضاني دوري (الشكل9.11). يتم توليد هذا الحقل بمجموعة من المغانط الموزعة بحيث تتناوب أقطابها في مسار حزمة الإلكترونات. يدعى هذا الصفيف من المغانط أحياناً مموّجاً undulator أو مذبذِباً "wiggler" لأنه يرغم إلكترونات الحزمة أن تتخذ مساراً جيبياً. يؤدي تسارع الإلكترونات وفق هذا المسار إلى إصدار فوتونات.

يمكن التعامل مع الحقل المغنطيسي الذي ينظر إليه نسبوياً من الإطار السكوني للإلكترون، على أنه فوتون افتراضي. إذْ يؤدي اصطدام إلكترون بالفوتون الافتراضي إلى توليد فوتون ينتشر بحرية (انتثار كومتون). تقوم مرايا بأسر الفوتونات المتحررة لتحدث ربحاً تجاوبياً. يمكن توليف الطول الموجي بسهولة وبسرعة على مجال كبير من خلال التحكم بطاقة حزمة الإلكترونات (سرعة الإلكترونات أو طاقتها أو كليهما) أو بشدة الحقل المغنطيسي. ولأن انتثار كومتون بحد ذاته معقد، من الأسهل القول: إنَّ المموج يرغم الإلكترونات على اتخاذ مسار جيبي وفق محوره الطولاني (الاتجاه الطولاني) وفي إطاره السكوني، ثم تنتقل إلى إطار سكوني جديد يتحرك فيه المموج في الاتجاه الطولاني بحيث تهتز الإلكترونات حول نقطة سكونية. والإشعاع الصادر في هذه الحالة ليس إلاّ إشعاع ثنائي قطب يعود لاهتزازات الإلكترونات حول تلك النقطة الثابتة. يُرى إشعاع ثنائي القطب في باقي الإطار السكوني للمموج على أنه إشعاع طوله الموجي أقصر، وينتشر إلى الأمام وفق طوله.

ولما كانت طاقة الفوتون الصادر (الإشعاع) تعتمد على سرعة الإلكترون وعلى شدة الحقل المغنطيسي، أمكن توليف ليزر الإلكترونات الحرة، أي يمكن التحكم بتواتر الليزر أو لونه.



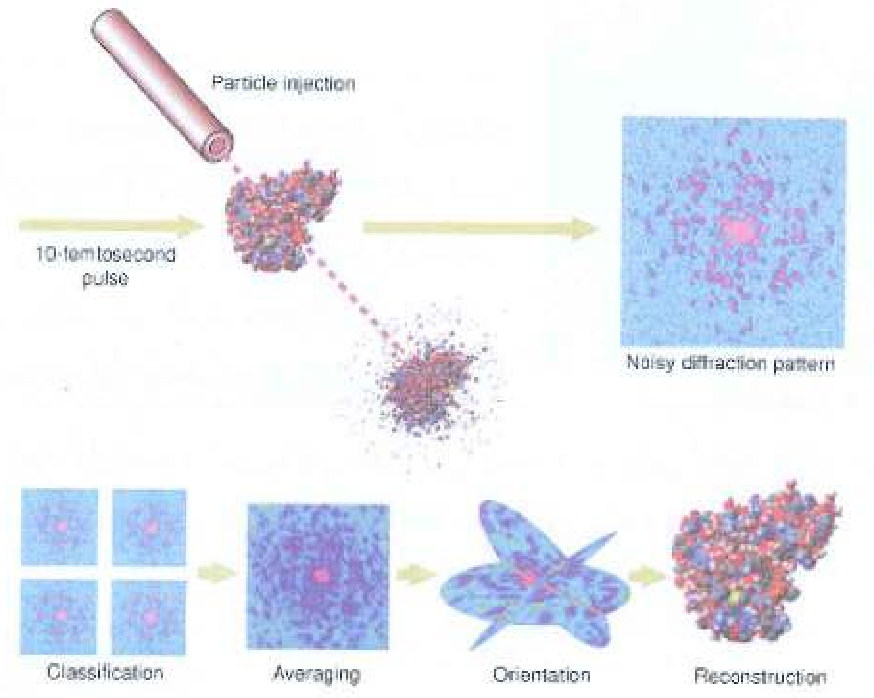
الشكل9.11. الشكل التخطيطي لليزر الإلكترونات الحرة.

إن الذي يجعله ليزراً أن حركة الإلكترونات تتفق في الطور مع حقل الضوء الصادر، ومِنْ ثَمّ تنضم الحقول بشكل مترابط. ولاعتماد شدة الضوء على مربع الحقل، فإن هذا الأمر يزيد من الخرج الضوئي. (من المدهش أنه لاحاجة للميكانيك الكمومي في هذا التفسير). إن أي إشعاع يتحرك في الإطار السكوني للمموج يستمر بالانتقال بسرعة الضوء ويتجاوز الإلكترونات فيه ويجعلها تتواصل لتتزامن. وغالباً ما يتم إدخال الضوء نفسه من الخارج (أي الإشعاع). وبحسب موقع الإلكترونات في المموج تكون اهتزازاتها متطاورة مع الإشعاع أو غير متطاورة. يسعى الضوء إلى تسريع هذه الإلكترونات أو تبطيئها. تكتسب الإلكترونات بذلك الطاقة الحركية أو تخسرها، فتزداد سرعتها في المموج أو تنخفض. من شأن هذا الأمر أن يجعل الإلكترونات تتوزع في رزم، وتترابط فتصدر إشعاعاً مترابطاً.

9.4.6.2. ليزر الإلكترونات الحرة بالأشعة السينية:

يصرح باحثون في ليزر الإلكترونات الحرة، بأنه تم الانتقال خلال قرن من التساؤل فيما إذا كانت الذرات موجودة إلى إمكانية تصويرها عملياً في البلورات، وأن تصوير الذرات في الجزيئات البيولوجية الضخمة أو

المعقدات البروتينية أو الفيروسات اللابلورية أصبح ممكناً. تكمن التقانة الأساسية لذلك في أن بناء هذه الصور ممكن عند حقن جزيء وحيد في مسار نبضة سينية قادمة، ومن ثم قياس نموذج الانعراج الناتج -نموذج انتثار الأشعة السينية قبيل انفجار الجزيء لدى امتصاصه للطاقة، يكون نموذج الانعراج ذا تباين كاف بسبب كثافة الطاقة العالية. لأن "الجزيء الواحد لا يعطي صورة كاملة ثلاثية الأبعاد للجزيء، يتم تكرار العملية عدداً كبيراً من المرات. ثم تجمع البيانات من كل الصور لبناء موديل ثلاثي الأبعاد للجزيء يعطي بنية وسطية لذلك الجزيء.



الشكل9.12. (a) لتصوير الجزيئات الحيوية بمقدرة فاصلة ذرية تحقن الجزيئات الواحد بعد الآخر في مسار حزمة FEL، ويعرض كل جزيء لومضة من FEL ويسجل نموذج انعراج الأشعة السينية ثنائي البعد في الجزيء قبل أن يتفكك. (b) يتم بناء صورة ثلاثية الأبعاد وحيدة لجزيء تمثيلي من مجموعة البيانات المكونة من ملايين نماذج الانعراج.

مع أن تصوير نوع الجزيء نفسه في كل مرة، يختلف نموذج الانعراج من جزيء إلى آخر. يرجع السبب في ذلك جزئياً للحركة البراونية. حيث تقفز الجزيئات وكذلك الذرات. وتخضع الذرات أيضاً للاهتزاز الحراري، ومع أن الذرات مرتبطة فيما بينها فإنها تتجول. بعض الذرات يتأرجح في نهاية روابطها مثل كرة مرتبطة a tether ball. ولحل هذه المشكلة يجري ابتكار طرائق لتوجيه الجزيئات ومِنْ ثَمّ يكون لها التوجه نفسه في أثناء التصوير.

9.4.6.3. التطبيقات الطبية لليزر الإلكترونات الحرة

قد يكون التحكم في الأطوال الموجية لليزر الإلكترونات الحرة وارتفاع كثافة إشعاعيتها جعل البعض يتحدث عن إمكانية تسخين الماء في النسيج بالليزر بأطوال موجية تحت حمراء، وتسخين اللبيدات تحت

الجلد بالأطوال الموجية 915nm و 1210nm و 1720 nm بدرجات متفاوتة بشكل أقوى منه في حالة الماء. تتضمن التطبيقات الممكنة إتلاف اللبيدات التي تفرزها الغدد الدهنية بشكل نوعي في معالجة حب الشباب، بالإضافة إلى استهداف لبيدات أخرى لدى معالجة التوضعات الدهنية تحت الجلد cellulite والتوضعات الكوليسترولية في الشرايين atherosclerosis.

9.5. خصائص إشعاع الليزر



الشكل9.13a

يتميز إشعاع الليزر بترابط Coherency أمواجه نتيجة للإصدار المحثوث، كما يتصف، نتيجة لوجود حجرة التجاوب، بشدته وبتوجهيته Directivity وبوحدانية لونه Monochromatic (الشكل9.13)، وهو يصنف كمنبع للإشعاع الضوئي ضمن الإطار العام لطيف الإشعاعات الكهرطيسية. إذْ يظهر في الشكل صورة لليزر الهليوم-نيون. الشعاع المتوهج في الوسط هو انفراغ كهربائي يولد الضوء بطريقة تشبه كثيراً ضوء النيون. يمر الليزر في وسط الربح وليس حزمة الليزر نفسها التي ترى هناك. أما حزمة الليزر فهي تعبر الهواء وتحدث نقطة حمراء على شاشة إلى اليمين.

طيف ليزر الهليوم نيون في الشكل9.13b مثال على النقاوة الطيفية العالية لكل الليزرات تقريباً، مقارنة بالإصدارية الطيفية الواسعة لثنائي مصدر ضوئي LED.

ولفهم الفارق الكبير بين إشعاع الليزر وإشعاع أي منبع ضوئي تقليدي لا بد من المقارنة بين خصائصهما الموافقة.

الشكل9.13b

في الجدول9.1 مقارنة بين الخصائص الطيفية لمصباح الزئبق والخصائص الطيفية لليزر الأكثر شيوعاً وهو الهليوم _ النيون. ولكن أهم هذه الخصائص في هذه الحالة هو التألق الطيفي أو السطوع الذي يمثل مقدار الطاقة الصادرة من واحدة السطوح من المنبع في واحدة الزمن لكل ستيراديان من الزاوية الصلبة

التي يتم الإصدار من خلالها ولكل وحدة من عرض طيف الإشعاع الصادر. إذْ نرى بوضوح كيف أن سطوع ليزر الهليوم _ النيون الذي تقل استطاعته بمئة ألف مرة عن استطاعة مصباح الزئبق، أكبر بمقدار عشرة ملايين مرة منه في حالة الزئبق. يرجع هذا الأمر إلى حقيقة أن الإصدار الليزري يحدث وفق شريط تواتري ضيق جداً وأن أهمية الليزرات كلّها تتركز في الواقع، حول شدة هذه النقاوة الطيفية. يضاف إليها خاصية مكانية أساسية تميز توجهية الإشعاع. فتباعد حزمة الليزر ضعيف جداً: إذْ إن الزاوية الصلبة التي يحدث الإصدار من خلالها صغيرة جداً، وتقدر بالمكروستيراديان.

الجدول9.1. مقارنة بين الخصائص الضوئية لمنبع ضوئي تقليدي وليزر الهليوم نيون

	مصباح بخار الزئبق التقليدي	ليزر الهليوم-نيون
الطول الموجي	$546.0\ nm$	$632.8\ nm$
الاستطاعة	$100\ W$	$1\ mW$
عرض الشريط الطيفي	$\Delta_\lambda \approx 10\ nm$	$\Delta_\lambda = 2\times10^{-3}\ nm$
زاوية الإصدار الصلبة	$\delta\Omega = 4\pi\ Sr$	$\delta\Omega \cong 10^{-6}\ Sr$
التألق الطيفي (السطوع)	$1 W/cm^2 \cdot Sr\,nm$	$5\times10^7\ W/cm^2 \cdot Sr\,nm$

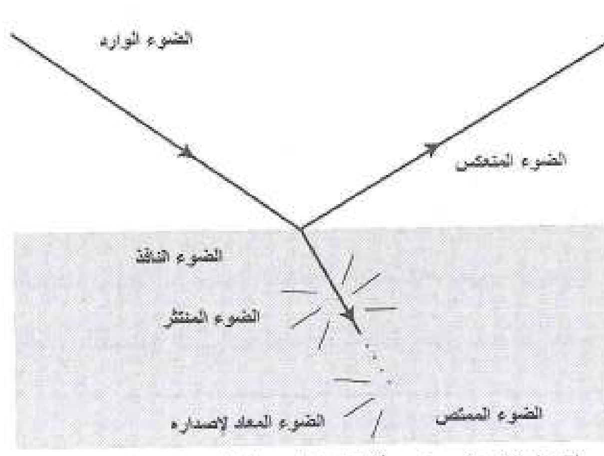
إن الليزرات النبضية تصدر الطاقة الضوئية وفق نبضات خاطفة تستمر عموماً من نحو بضع فمتوثانيات إلى نحو بضع مليثانيات، كما يتم تركيز الطاقة بشكل وقتي. وهكذا فإن السطوع الطيفي الذي يوافق الاستطاعة الذروية التي تقدر بنحو بضعة ميغاواط، في الليزر الياقوتي أعلى بنحو 10^{18} مرة منه في حالة الشمس (ضمن الزاوية الصلبة نفسها وعرض الخط الطيفي نفسه).

يمتد المجال المفيد من طيف الإشعاعات الكهرطيسية، الذي تصدر ضمنه معظم منابع الليزر، من المجال تحت الأحمر المتوسط $\lambda = 10\ \mu m$ إلى فوق البنفسجي القريب $\lambda = 200\ nm$. ثمة أجهزة تعمل خارج حدود هذا المجال ولكنها ما تزال مختبرية. يبدي الشكل9.5 في هذا الجزء من الطيف المواقع الموافقة لأطوال أمواج إصدار أكثر منابع الليزر المتوافرة في السوق شيوعاً، ونخص منها ما يستعمل في الطب كالتالي:

9.6. تفاعل إشعاع الليزر مع النسج: آليات تأثير النسج في الضوء

يمكن للنسج أن تؤثر في ضوء الليزر (الإشعاع الكهرطيسي عموماً) بطرائق كثيرة. يظهر في الشكل9.14 الحالة النموذجية التي تحدث، عندما ترد حزمة ضوئية على شريحة من نسيج معين. إذْ يمكن للشريحة أن تعكس الإشعاع أو تنثره أو تمرره أو تمتصه.

إن ضوء الليزر عندما يسقط على المادة الحية فإمّا أن يمتص فيها وإمّا يرتدّ عنها وإمّا ينتثر فيها وإمّا ينفذ منها. وفي الحالة التي يحدث فيها امتصاص للضوء فإمّا أن يعقب ذلك إشعاع للفلورة أو أن تتدخل آليات أخرى من شأنها إتلاف الخلايا كالمفعول الحراري أو الفوتوكيميائي أو الاستئصال الضوئي أو الكهربائي أو الميكانيكي أو الكمومي، وبقدر ما يكون امتصاص النسيج للضوء شديداً يكون عمق اختراقه أضعف وآثاره أكثر سطحية.



الشكل9.14. هندسة الانعكاس والانكسار والامتصاص والانتثار.

هذا وإن مكونات المادة الحية تختلف في امتصاصها للضوء بحسب الطول الموجي، فالماء الذي يدخل في تركيب الجسم بنسبة كبيرة يمتص بشدة في المجال فوق البنفسجي البعيد $(\lambda < 200\ nm)$ وفي تحت الأحمر البعيد (أي بدءاً من $\lambda = 1300\ nm$)، كما تتميز الجزيئات العطرية الحلقية في البروتينات والحموض النووية بامتصاص أعظمي في المجال $(260\ nm < \lambda < 280\ nm)$، ولهذا فإن عمق اختراق أضواء الليزر فوق البنفسجي وتحت الأحمر في النسج ضئيل جداً. تعود حمرة الدم إلى شدة امتصاص الهموغلوبين في مجالات الأزرق والأخضر والأصفر. أما فيما يتعلق بالميلانين، وهو الصباغ السائد في البشرة، فهو يمتص في مجال واسع يمتد من فوق البنفسجي إلى تحت الأحمر القريب. أما الضوء الواقع في المجال $(600\ nm < \lambda < 1300\ nm)$ فتخامده في النسج الحيوية ضئيل جداً، وتكون شفافية الجسم أكبر ما يمكن عند الطول الموجي $(\lambda = 1000\ nm)$.

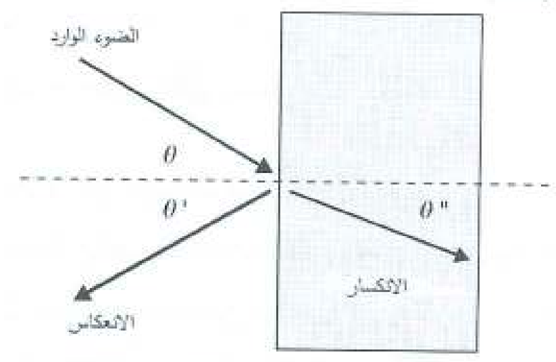
ثمة علاقة وثيقة بين ظاهرتي الانعكاس والانكسار يمكن التعبير عنها بقوانين فرنل التي تعتمد على الفرق بين قرائن الانكسار. يوصف الانكسار في الشكل9.15 بأنه انحراف للحزمة النافذة. غير أن الانكسار لا يؤدي دوراً مهماً في تطبيقات الليزر الطبية إلاّ في حالة الأوساط الشفافة التي تتعرّض لإشعاع الليزر كنسيج القرنية مثلاً أو في حالة استخدام ليزر التيراهرتز في الكشف عن النخور السنية. يكون قياس مفعول الانكسار في الأوساط العاتمة عادة صعباً بسبب الامتصاص والانتثار.

لا ينفذ من الشريحة، ويسهم في الشدة التي يتم الكشف عنها خلف الشريحة إلاّ الفوتونات غير المنعكسة وغير الممتصة والمنتثرة إلى الأمام. يعتمد الضياع في الحزمة الواردة الذي يكون سائداً بشكل رئيسي _ الانعكاس أو الامتصاص أو الانتثار- على نوع النسيج والطول الموجي للحزمة الواردة. يعد الطول الموجي، برامتراً مهماً فعلاً. فهو يحدد قرينة الانكسار بالإضافة إلى معاملي الامتصاص والانتثار.

تتحكم قرينة انكسار الهدف بانعكاسيته الإجمالية. ولا تكون علاقة هذه القرينة وثيقة بالطول الموجي إلاّ في المناطق العالية الامتصاص. في حين يأخذ معامل الانتثار من جهة أخرى مقياساً يتناسب عكسياً مع القوة الرابعة للطول الموجي كما سنجد لدى مناقشة انتثار ريليه Rayleigh scattering.

إن معرفة الخصائص الامتصاصية والانتثارية لنسيج معين في الجراحة الليزرية أساسية بغرض التنبؤ بالمعالجة الناجحة. ربما تكون قرينة الانكسار ذات أهمية كبيرة لدى تطبيق الإشعاع الليزري على السطوح العالية الانعكاسية كالزروع المعدنية في السنية أو التجبير (تقويم الأعضاء) orthopedics.

9.6.1. الانعكاس والانكسار



الشكل 9.15. هندسة الانعكاس والانكسار المرآتيَيْن.

يختلف الانعكاس عن سطح أملس مقابل الانعكاس عن سطح خشن. والسطح العاكس عموماً هو السطح الفاصل بين مادتين مختلفتين بقرينتي انكسارهما كالهواء والنسيج. ينص قانون الانعكاس على أن زاوية الانعكاس θ' تساوي زاوية الورود θ في حالة السطوح الملساء التي تقل خشونتها عن طول موجة الإشعاع، على النحو المبين في الشكل9.15. وبالعكس عندما تكون خشونة السطح العاكس من مرتبة طول موجة الإشعاع أو تزيد، يحدث ما يدعى الانعكاس التبعثري diffuse reflection. ويعد الانعكاس التبعثري ظاهرة عامة في كل النسج لكون سطوح النسج غير مصقولة إلى درجة عالية كما في المرايا الضوئية.

يحدث الانكسار عادة عندما يفصل السطح العاكس بين وسطين مختلفين في قرينتي انكسارهما. وينشأ عن التغير في سرعة الموجة الضوئية لدى الانتقال من وسط إلى آخر. تعرف العلاقة الرياضية البسيطة التي يخضع لها الانكسار بقانون سنيل Snell's law، الذي يعطى بالعلاقة:

$$n\sin\theta = n'\sin\theta' \qquad (9.1)$$

9.6.2. الامتصاص

ذكرنا في بداية الفقرة 9.7 العمليات المختلفة التي يمكن أن تعقب امتصاص النسيج للضوء. نضيف إلى ذلك ظهور حزمتي امتصاص شديدتين عند الطولين الموجيين 2.9μm و6.0μm. وهما تنجمان عن الحركات الاهتزازية والدورانية لجزيء الماء. نتناول فيما يلي مظاهر الامتصاص الرئيسية.

تتخامد شدة الموجة الكهرطيسية الواردة نتيجة الامتصاص لدى مرورها في وسط معين. يعود الامتصاص في مادة ماصة معينة إلى التحول الجزئي لطاقة الضوء إلى حركة حرارية أو اهتزازية معينة لجزيئات تلك

المادة. يسمح الوسط الشفاف المثالي بمرور الضوء من دون أي امتصاص، أي إن الطاقة الإشعاعية الكلية التي تدخل الوسط وتخرج منه هي نفسها. يمكن النظر لنسيجي القرنية والعدسة الحيويين كنسيجين عاليي الشفافية للضوء المرئي. في حين توجد أوساط ينخفض فيها الإشعاع الوارد عملياً إلى الصفر فهي عاتمة.

إن مصطلحي شفاف وعاتم نسبيان، لأنهما يعتمدان بالتأكيد على الطول الموجي. يتكون كل من القرنية والعدسة مثلاً بشكل رئيسي من الماء الذي يبدي امتصاصاً شديداً في الطيف تحت الأحمر. ومن ثم يبدو هذان النسيجان عاتمين في هذه المنطقة الطيفية. لا يوجد عملياً أي وسط يكون إما شفافاً لكل أطوال أمواج الطيف الكهرطيسي وإمّا عاتماً.

تعتمد قدرة وسط معين على امتصاص الإشعاع الكهرطيسي على عدد من العوامل وبشكل رئيسي على البنية الإلكترونية لذراته وجزيئاته وطول موجة الإشعاع وثخانة الطبقة الماصة والبرامترات الداخلية للوسط كدرجة حرارة العوامل الماصة أو تركيزها. غالباً ما يطبق قانونان يصفان تأثير إما الثخانة وإمّا التركيز على الامتصاص على الترتيب. يطلق عليهما عادة قانون لمبرت Lambert's law وقانون بير Beer's law ويكتبان بالشكل:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z) \quad \text{Lambert's law} \tag{9.2}$$

$$I(z) = I_0 \exp(-k'cz) \quad \text{Beer's law} \tag{9.3}$$

حيث ترمز z إلى محور انتشار الضوء، و$I(z)$ الشدة عند البعد z، و I_0 الشدة الواردة، و α معامل امتصاص الوسط، و c تركيز العوامل الماصة، و k' يعتمد على برامترات داخلية غير التركيز. ولأن كلا القانونين يصف سلوك الامتصاص نفسه، يعرفان أيضاً بقانون لمبيرت بير Lambert–Beer law.

نحصل من العلاقة 9.2، على:

$$z = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{I_0}{I(z)} \tag{9.4}$$

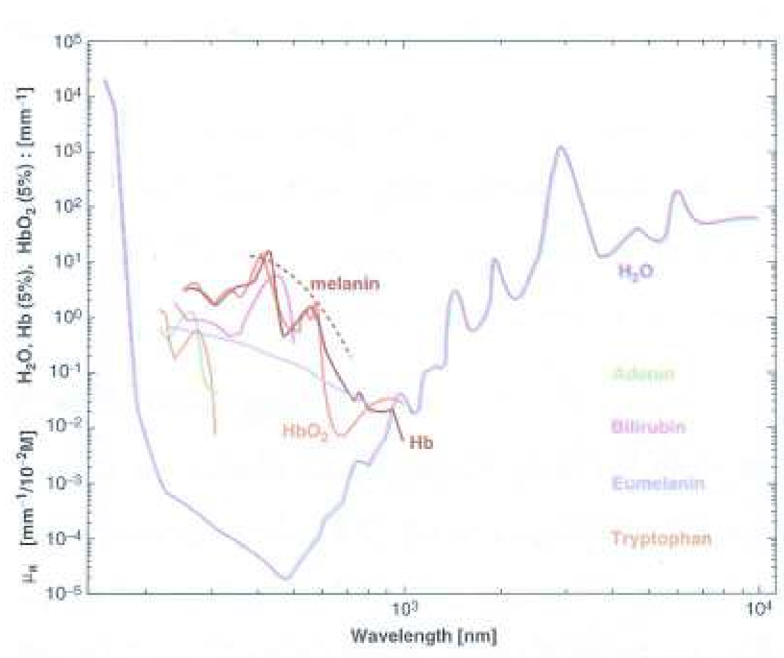
كما يطلق على مقلوب معامل الامتصاص α طول الامتصاص L أي:

$$L = \frac{1}{\alpha} \tag{9.5}$$

لأنه يقيس طول الامتصاص، أي البعد z، الذي تنخفض عنده شدة الامتصاص $I(z)$ إلى 1/e من قيمتها الواردة.

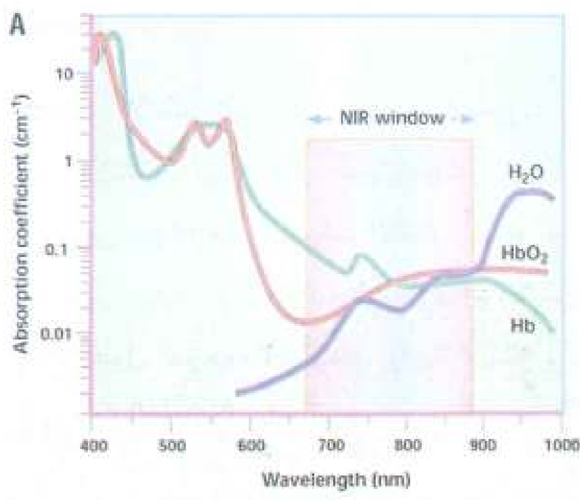
ينجم الامتصاص في النسج الحيوية بشكل رئيسي إما عن جزيئات الماء وإمّا الجزيئات الضخمة كالبروتينات والأصبغة. بينما ينسب الامتصاص في منطقة تحت الأحمر بشكل رئيسي لجزيئات الماء،

في حين ينسب في المجال فوق البنفسجي والمرئي من الطيف إلى البروتينات بالإضافة إلى الأصبغة بشكل رئيسي.



الشكل9.16. أطياف امتصاص حوامل اللون في النسيج البيولوجي الرخو منها الميلانين في الجلد والهموغلوبين في الدم. تقع قمم الامتصاص النسبية للهموغلوبين عند الأطوال الموجية 280nm و420nm و540nm و580nm.

يظهر في الشكل9.16 أطياف الامتصاص لمجموعة من حوامل اللون chromophores في النسيج الحيوي الرخو منها الميلانين melanin والهموغلوبين HbO2. يعد الميلانين الصباغ الأساسي في الجلد، وهو حتى الآن أهم حامل لون جلدي. يزداد معامل امتصاصه على نسق واحد في الطيف المرئي نحو البنفسجي. يتميز الهموغلوبين الذي يسود في النسيج الوعائي، بنهايات امتصاص نسبية عند الأطوال الموجية 280nm و420nm و540nm و580nm ثم يبدي انقطاعاً عند نحو 600 nm. ولعدم امتصاص الجزيئات الضخمة أو الماء في المجال تحت الأحمر القريب تتحدد نافذة مداواة "therapeutic window" بين نحو 600nm و1200nm (الشكل9.17). حيث يخترق الإشعاع في هذا المجال الطيفي النسج الحيوية بضياع أخفض ومِنْ ثَمَّ يمكّننا من معالجة البنيات النسيجية الأعمق.



الشكل9.17. النافذة العلاجية في النسج

بما أن الهموغلوبين يسود في النسيج المروي vascularized tissue وله قمم الامتصاص نفسها في الحالتين المؤكسد وغير المؤكسد. ولما كان الطولان الموجيّان الأخضر والأصفر في ليزرات الكربتون الإيوني عند 531nm و568nm على الترتيب، يتواءمان بشكل مثالي مع قمتي امتصاص الهموغلوبين،

أمكن استخدام هذه الليزرات في تخثير الدم والأوعية الدموية. يمكن أن تكون الليزرات الصباغية في بعض التطبيقات السريرية الخيار البديل، نظراً لإمكانية الاستفادة من قدرتها على توليف توائم عصابات امتصاص خاصة في بروتينات وأصبغة نوعية.

غير إن امتصاص النسيج الحيوي ليس وحده المهم في الجراحة الطبية الليزرية. غالباً ما تطبق في بعض التطبيقات الليزرية مثل sclerostomies، أصبغة وأحبار خاصة قبيل التعرض لليزر. بهذه الوسيلة يزداد معامل الامتصاص الأصلي للنسيج النوعي، ما يؤدي إلى ارتفاع فعالية المعالجة الليزرية. أضف إلى ذلك أن ضرر النسيج المجاور يكون أقل بفعل زيادة الامتصاص.

9.6.3. الانتثار scattering

عندما تعرض جسيمات مشحونة ومرتبطة ارتباطاً مرناً لأمواج كهرطيسية تشرع الجسيمات بالحركة بتأثير الحقل الكهربائي. إذا كان تواتر الموجة مساوياً التواتر الطبيعي للاهتزازات الحرة لجسيم يحدث تجاوب مصحوباً بمقدار كبير من الامتصاص. من جهة أخرى يحدث الانتثار، عند تواترات لا تقابل التواترات الطبيعية للجسيمات. يتحدد الاهتزاز الناتج بالاهتزاز القسري. يكون لهذا الاهتزاز عموماً التواتر والاتجاه نفسه للقوة الكهربائية في الموجة الواردة. غير أن سعته أصغر بكثير منها في حالة التجاوب. كما أن طور الاهتزاز القسري يختلف عنه في الموجة الواردة، مما يؤدي إلى تبطيء الفوتونات لدى اختراقها وسطاً أكثر كثافة. ومن ثم يمكن النظر للانتثار أنه المنشأ الأساسي للتشتت والابتعاد عن مسار الحزمة الرئيسية.

يختلف الانتثار المرن عن الانتثار اللامرن، وذلك حسب ما يتحول جزء من طاقة الفوتون في أثناء عملية الانتثار. في الانتثار المرن حيث يكون للفوتون الوارد والفوتون المنتثر الطاقة نفسها. وفي الحالة التي تكون فيها أبعاد جسيمات الانتثار أصغر من طول موجة الإشعاع الوارد يطلق على الانتثار المرن اسم انتثار ريليه Rayleigh scattering، (الشكل9.18) الذي تتناسب فيه شدة الانتثار عكسياً مع القوة الرابعة لطول الموجة، كما تتعلق بزاوية الانتثار وفق العلاقة:

$$I_s \sim \frac{1+\cos^2(\theta)}{\lambda^4} \qquad (9.6)$$

إذ يحدث الانتثار الأمامي عند $\theta = 0$. تدل العلاقة على انخفاض الانتثار بشكل ملحوظ في المجال المرئي عند الضوء الأحمر مقارنة به في حالة الضوء الأزرق.

الشكل9.18.

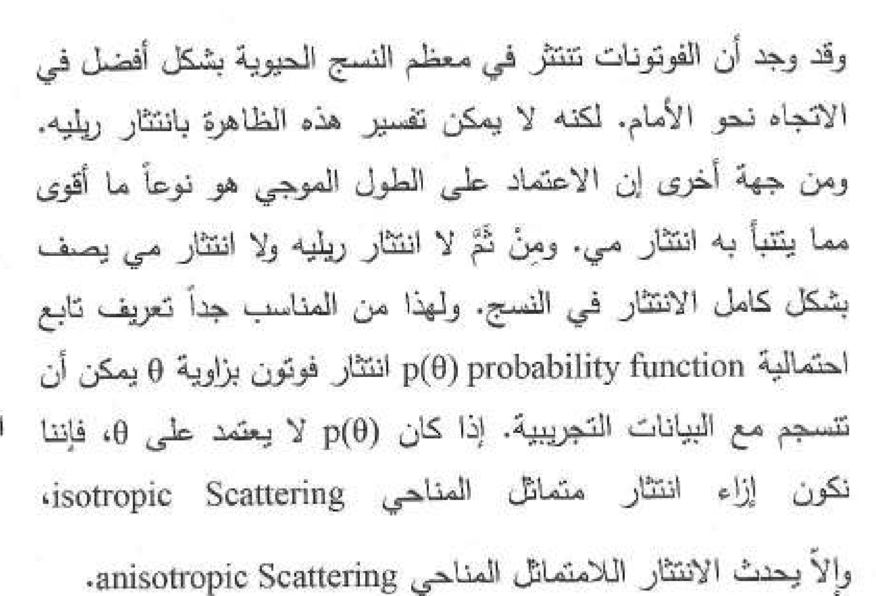
إن انتشار ريليه انتشار مرن، أي إن للضوء المنتثر قيم الشعاع الموجي $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ والطول الموجي λ نفسها للضوء الوارد. ثمة نوع مهم من الانتثار غير المرن يعرف **بانتثار بريلوان** Brillouin scattering، ينجم عن تدخل الأمواج الصوتية التي تنتشر في وسط معين، ومِنْ ثَمَّ تحرّض لا تجانسيات في قرينة الانكسار. يحدث انتثار بريلوان للضوء نحو تواترات أعلى (أو أخفض)، حسب ما تقترب الجسيمات الناثرة من المنبع الضوئي أو تبتعد عنه. ومِنْ ثَمَّ يمكن النظر إليه على أنه مفعول دوبلر ضوئي optical Doppler effect، ينزاح فيه تواتر الفوتونات نحو القيم الأعلى أو الأخفض. غير أن انتثار بريلوان في تفاعلات الليزر مع النسج لا يصبح ملحوظاً إلاّ في أثناء توليد أمواج صادمة.

وقد تم، في اشتقاق قانون ريليه، إهمال الامتصاص. ولهذا لا تسري المعادلة (9.6) إلاّ في حالة الأطوال الموجية البعيدة عن أي عصابة امتصاص. يضاف إلى ذلك أنه لم يؤخذ في الحسبان التوزع المكاني للجسيمات. إذا كان يمكن مقارنة امتداد الجسيمات بطول موجة الإشعاع الوارد كخلايا الدم، يحدث نوع آخر من الانتثار يدعى انتثار مي Mie scattering (الشكلان 9.19, 20). يجدر بالذكر أن انتثار مي يختلف عن انتثار ريليه من حيث إن الأول يبدي ارتباطاً بالطول الموجي $\sim \lambda^{-x}$ أضعف منه في الثاني $\sim \lambda^{-4}$، حيث $0.4 \le x \le 0.5$ كما أن انتثار مي يحدث بشكل أفضل في اتجاه الأمام، بينما يتناسب انتثار ريليه طردياً مع $1+\cos^2(\theta)$، أي إن شدتيه الأمامية والخلفية متساويتان.

الشكل9.19.



الشكل9.20.



وقد وجد أن الفوتونات تنتثر في معظم النسج الحيوية بشكل أفضل في الاتجاه نحو الأمام. لكنه لا يمكن تفسير هذه الظاهرة بانتثار ريليه. ومن جهة أخرى إن الاعتماد على الطول الموجي هو نوعاً ما أقوى مما يتنبأ به انتثار مي. ومِنْ ثَمَّ لا انتثار ريليه ولا انتثار مي يصف بشكل كامل الانتثار في النسج. ولهذا من المناسب جداً تعريف تابع احتمالية probability function $p(\theta)$ انتثار فوتون بزاوية θ يمكن أن تنسجم مع البيانات التجريبية. إذا كان $p(\theta)$ لا يعتمد على θ، فإننا نكون إزاء انتثار متماثل المناحي isotropic Scattering، وإلاّ يحدث الانتثار اللامتماثل المناحي anisotropic Scattering.



الشكل 9.21. انتثار ريليه ومي عن البنيات النسيجية.

9.6.4. تعدد انتثار الضوء

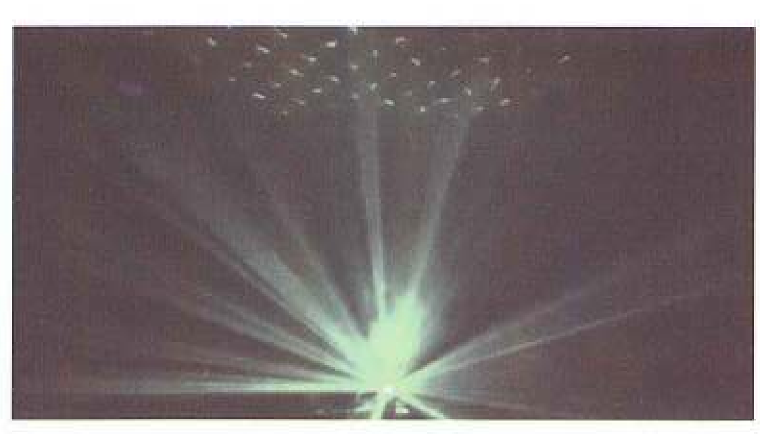
عندما لا ينتثر الإشعاع إلّا عن مركز ناثر متوضع واحد قبل أن يبرز، تدعى الظاهرة الانتثار الأحادي single scattering. لكنه يحدث في أكثر الأحيان أن تتجمع المراكز الناثرة معاً، وفي تلك الحالات التي يمكن فيها للإشعاع أن ينتثر مرات كثيرة، حيث تعرف هذه الظاهرة بالانتثار المتعدد multiple scattering. يكمن الفارق الرئيسي بين مفعولي الانتثار الأحادي والمتعدد في أنه يمكن التعامل مع الانتثار الأحادي عادة كظاهرة عشوائية في حين أن الانتثار المتعدد أكثر خضوعاً للإحصائية stochastic.

في حالة الانتثار الأحادي، تسعى عشوائية التأثرات لأن تمثل بعدد كبير من حوادث الانتثار بحيث يبدو المسار النهائي للإشعاع توزعاً حتمياً للشدة، وتمثل ظاهرة عبور حزمة ضوئية الضباب الكثيف مثالاً على ذلك. أما الانتثار المتعدد فهو يشبه التبعثر diffusion إلى حد بعيد، ويمكن المبادلة بين تعبير الانتثار المتعدد والتبعثر في الكثير من السياقات. تعرف العناصر الضوئية المصممة لتوليد الانتثار المتعدد بالمبعثرات diffusers. تعزى ظاهرة الانتثار الخلفي المترابط Coherent backscattering وهي الظاهرة القوية للانتثار الخلفي enhancement of backscattering التي تحدث عندما يتعدد الإشعاع المترابط في انتثاره في وسط عشوائي، عادة إلى تموضع ضعيف weak localization.

وبالمثل يمكن للانتثار المتعدد أن تكون له أحياناً نتائج عشوائية، وخاصة بالإشعاع المترابط. تدعى الترنحات العشوائية لشدة الإشعاع المترابط المنتثرة انتثاراً متعدداً "بالبقع" speckles. تحدث البقعة أيضاً عندما تنتثر أجزاء متعددة من الموجة المترابطة عن مراكز مختلفة. في بعض الحالات النادرة لا يمكن

للانتثار المتعدد أن يتضمن إلّا عدداً صغيراً من التفاعلات بحيث لا تشكل العشوائية القيمة الوسطية تماماً. تعد نمذجة هذه الجمل بدقة من الأكثر صعوبة.

يوفر الانتثار المتعدد للضوء في النسيج الحيوي مجساً آمناً رخيص الثمن وغير هجومي لأورام الدماغ والصدر والجلد. تعتمد الطريقة الضوئية في التصوير، خلافاً لتصوير التجاوب المغنطيسي magnetic resonance imaging (MRI) الذي يعتمد على الأطوال الموجية الطويلة أو التصوير المقطعي بالأشعة السينية الذي يعتمد على الإشعاع القصير الطول الموجي جداً، على استخدام نافذة متوسطة من الأطوال الموجية، تتأثر بتركيز الهموغلوبين المؤكسج في النسيج ومِنْ ثَمَّ توفر صورة تشخيصية مبكرة للعمليات الاستقلابية التي تقود للسرطان قبل التلف البنيوي الذي يسببه الورم. تجري حالياً بحوث ترمي إلى تطوير نظرية مجهرية لانتشار تابع ترابط الحقل الكهربائي بين نقطتين two-point electric field correlation function للضوء تحت الأحمر القريب الذي ينتشر وينتثر في نسيج حيوي يحوي لا تجانسية إحصائية (الورم). يبدي الورم امتصاصاً مفضلاً للضوء كما يمكن أن تختلف خصائصه الانتثارية عنها في حالة نسيج سليم. إذْ يتأثر هذا التابع الضوئي للنسيج باختلاف خصائصه الامتصاصية والانتثارية. تكمن صعوبة هذه الطريقة، خلافاً لتقنيتي الأشعة السينية وتصوير التجاوب المغنطيسي اللتين ينتشر الإشعاع فيهما وفق خطوط مستقيمة، في خضوع الضوء لمسار انتثار متعدد ومعقد في النسيج. يهدف البحث المذكور إلى فرز المعلومات الخاصة بخصائص النسيج التي يتضمنها حقل الموجة الضوئي بعد انتثاره عدداً كبيراً من المرات. يمكن لهذه الدراسة أن تحسن المقدرة الفاصلة للطريقة الضوئية بعدة مراتب، وتسهل إعادة بناء صور النسيج بمقدرة فاصلة على سلم طول موجة الضوء، كما أن أدوات التصوير التي تعتمد على هذه النظرية آمنة ورخيصة الثمن وتلائم الاستخدام في مكتب الممارس العام. ثمة تطبيقات أخرى تتضمن القدرة على تشخيص أورام الجلد من دون اللجوء إلى الخزع وإجراء اختبار الدم من دون سحب الدم.



الشكل9.22. ليزر عشوائي.

يمكن للنسيج الحيوي، الذي يعدّ وسطاً ضعيف الامتصاص لطول موجي معين لكنه ينثره انتثاراً مضاعفاً، أن يستعمل في تضخيم الضوء بالإصدار المحثوث وليزرة في وسط عشوائي تترافق بربح. كشفت التجارب الحديثة النقاب عن أن وسطاً متعدد الانتثار

مشوياً بجزيئات صباغية يمكن أن يبدي مفعول ليزر متماثل المناحي عندما يضخ بشكل مناسب. يجري حالياً ابتكار نظرية مجهرية لهذه الأصبغة الليزرية.

الفصل العاشر

التصوير بالليزر

Laser Imaging

طرأ في الآونة الأخيرة تقدم كبير على تقنيات التصوير الطبي. يتوافر حالياً عدد من الأدوات الفعالة للفحص السريري للبنيات الكبيرة في الجسم. من أوسع التقنيات انتشاراً التصوير الشعاعي والتصوير المقطعي المحوري المحوسب بالأشعة السينية (الفصل5) وتصوير التجاوب المغنطيسي (الفصل22) والتصوير بالصدى، الإيكوغرافي (الفصل17).

وقد لقي الضوء كتقنية ممكنة لتصوير النسج الحيوية مؤخراً اهتماماً كبيراً. يمكن في الفحوص النسيجية تمييز النسج غير الطبيعية من النسج الطبيعية بسبب الاختلاف في خصائصها الضوئية (كالامتصاص الضوئي أو الانعكاس، أو الانتثار أو البنية texture). ومِنْ ثَمَّ يمكن للتصوير الضوئي أن يكشف التباينات الضوئية موفراً معلومات إضافية للتشخيص الطبي. أضف إلى ذلك أن الضوء يمتاز من الأشعة السينية بكونه غير هجومي وغير مؤين، وأن تكلفة تقنيات التصوير الضوئي ربما تكون أخفض منها في حالة أكثر التقنيات المستخدمة حالياً.

10.1. الامتصاص الثنائي الفوتون

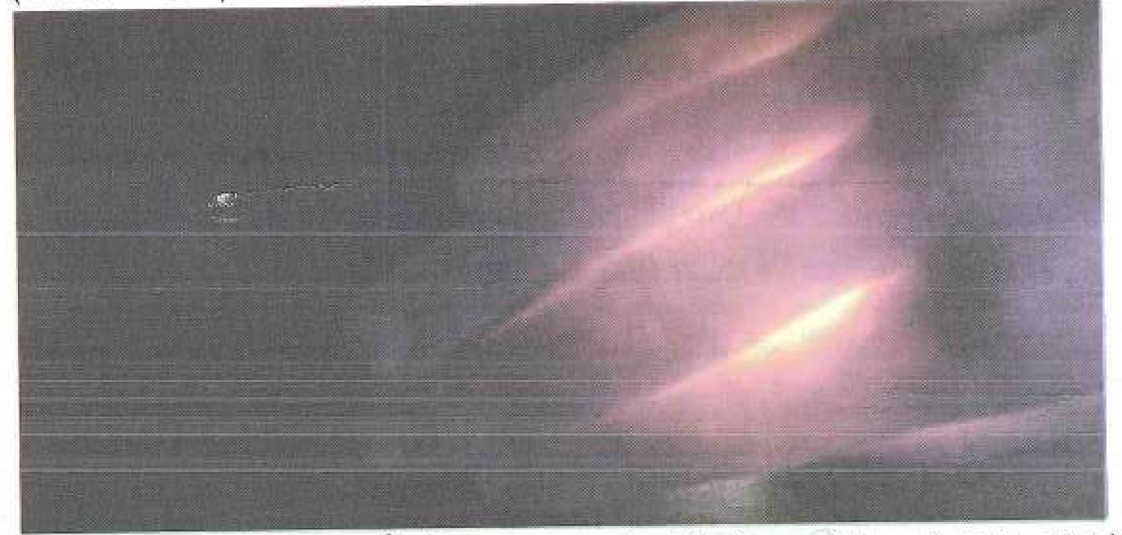
الامتصاص الثنائي الفوتون Two-photon absorption (TPA) هو الامتصاص الآني لفوتونين متماثلين أو مختلفين في التواتر لإثارة جزيء من حالة معينة (الحالة الأرضية عادة) إلى حالة إلكترونية طاقية أعلى. إن الفارق الطاقي بين الحالتين الأخفض والأعلى في الجزيء يساوي مجموع طاقتي الفوتونين. والامتصاص الثنائي الفوتون هو عملية من المرتبة الثالثة تكون أضعف من الامتصاص الخطي بعدة مراتب عند شدات ضوئية منخفضة. وهو يختلف عن الامتصاص الخطي في أن معدل الانتقال الذري الناجم عن TPA يعتمد على مربع الشدة الضوئية، ومِنْ ثَمَّ فهو ظاهرة ضوئية لا خطية، ومِنْ ثَمَّ يمكن أن يسود على الامتصاص الخطي عند الشدات العالية، ومِنْ ثَمَّ يجب أخذها في الحسبان عند استعمال ضوء ليزري.

إن النسج البيولوجية شفافة نسبياً في المجال تحت الأحمر القريب near infrared (NIR). غير أنها أوساط شديدة النثر ؛ ومِنْ ثَمَّ لا يمكن للطرائق الضوئية التقليدية أن توفر صوراً عالية الجودة. للتغلب على

هذه المشكلة، اقترح عدد من التقنيات: التصوير الضوئي في نطاق الزمن time-resolved optical imaging والتصوير الضوئي في نطاق التواتر frequency-domain optical imaging وتصوير الترابط الضوئي المقطعي optical coherence tomography. وقد برهنت هذه التقنيات على نجاحها في تعيين توزعات كل من الانتثار والامتصاص الضوئي في النسج الحيوية. ومع ذلك لا تزيد مقدرتها الفاصلة على 1cm في العينات التي تزيد سماكتها على عدة سنتمرات. اقتُرِحت، بالإضافة إلى هذه الطرائق الضوئية، تقنيات هجينة تجمع بين الضوء والنبضات فوق الصوتية. تتضمن هذه الطرائق التصوير الفوتوصوتي photoacoustic imaging، والتصوير المقطعي الضوئي المكيف بالأمواج فوق الصوتية ultrasonically modulated optical tomography. تكمن الفكرة الأساسية في استخدام الأمواج فوق الصوتية التي تنتثر بشكل أضعف بكثير منها في حالة الأمواج الضوئية، لتوفير معلومات تموضع أفضل better localization information للتصوير منها في حالة التقنيات الضوئية المحضة.

10.2. استكشاف الأعماق بالضوء المنتثر

تخرج من العضو المضاء، حتى لو كان ثخيناً، إشارة ضعيفة تتمثل في الضوء المنتثر عن النسج المختلفة، من شأن هذه الإشارة الكشف عن الخصائص الضوئية لتلك النسج. يمكن التأكد من ذلك، بوضع مصباح جيب خلف اليد: حيث يمكن رؤية الضوء الأحمر الذي ينفذ منها (انظر الشكل10.1).

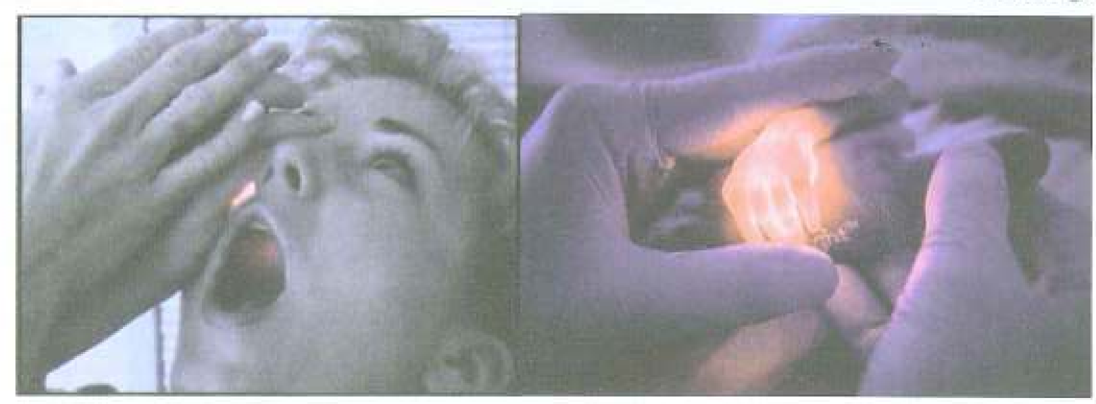


الشكل10.1. يخترق الضوء النسج الحيوية بشكل جزئي إذا لم تكن ثخينة. إذْ يمكن ملاحظة ذلك بإضاءة اليد بمصباح جيب بسيط. ويمكن إدراك الضوء الذي يخترق الأصابع على ضعفه. لا يمكن تشكيل صورة مباشرة للنسج الداخلية بسبب انتثاره عنها، ولو أنه يمكن الاستفادة منه.

يمكن بالضوء المنتثر تصوير الأعضاء الرقيقة التي تقع ثخانتها بين سنتمترين اثنين وثلاثة سنتمترات على الأكثر بطريقة مأمونة. إذ يمكن، باستخدام منابع ضوئية **استطاعتها أكبر** و**أكثر تلاؤماً** من مصباح

الجيب وبوجود **كواشف أكثر حساسية من العين**، بلوغ أعضاء أكثر عمقاً. تتطور هذه الطريقة منذ نحو عشرين عاماً وتزداد تطبيقاتها باستمرار في المختبر في دراسة فاعلية بعض الأعضاء وفي الأوساط الاستشفائية في التشخيص أو المتابعة السريرية لمختلف الإمراضيات.

إن فكرة استخدام الضوء في مراقبة البنى الداخلية للجسم البشري ليست جديدة. فقد دوّن الطبيب البريطاني ريتشارد برايت في عام 1831 ملاحظته **جمجمة مريض مموه الرأس** hydrocephalic بالنفوذ وذلك باستخدام شمعة موضوعة خلف رأس المريض الذي جرى فحصه في الظلام التام. وقد وصف الطبيب الإنكليزي توماس كرلنك Kurling في عام 1843 **فحصاً بصرياً لأورام الخصى بنفوذ الضوء**، أيضاً باستخدام شمعة. وقد ساعد **التنظير الشفوفي diaphanoscopy (الشكل11.2)** أو **تصوير الثدي ضوئياً مؤخراً في تقفي سرطان الثدي**. تكمن التقنية التي ظهرت في ثلاثينيات القرن الماضي في مراقبة ظل ثدي مضاء بمصباح ويتم الحصول عليه بالنفوذ. إذ يمكن أن يظهر عليه الورم، الذي تزيد ترويته أو كثافته عنها في حالة النسج التي تحيط به، على شكل بقعة أكثر عتامة؛ كما يظهر الجراب على شكل بقعة أقل عتامة.

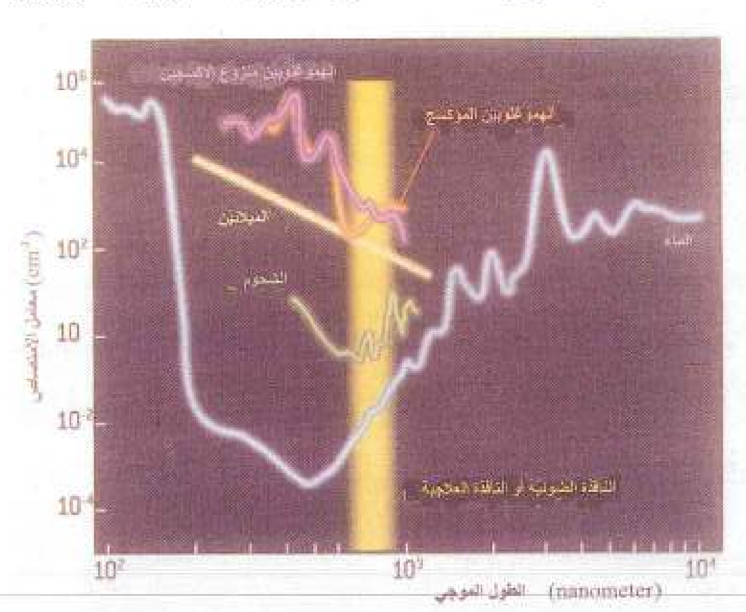


الشكل10.2. التصوير الشفوفي.

10.3. الانتثار والامتصاص: عيوبهما وأهميتهما

يمثل الامتصاص والانتثار مظهرين لتفاعل الضوء مع النسج الحيوية يجعلان استكشاف الجسم البشري بالضوء صعباً. إذ يتجلى هذان المظهران بسهولة من خلال مثال إنارة اليد بمصباح الجيب. ويتخامد الضوء لدى عبوره اليد نتيجة للامتصاص، فلا يبرز منه لدى مغادرته لها إلاّ بصيص ضئيل. ومن الجدير بالذكر أن تخامد الضوء يختلف باختلاف الطول الموجي. فالدم الذي يروي الجسم يمتص الضوء المرئي بشدة. ينخفض هذا الامتصاص لدى الانتقال نحو الضوء الأحمر وتحت الأحمر القريب. ولهذا السبب يكون الضوء النافذ أحمر اللون. يكون امتصاص النسج للضوء، عملياً، أقل ما يمكن في المجال الطيفي الواقع بين 650nm و 950nm (الشكل10.3). من شأن هذا المجال الطيفي أن يحدد النافذة

الضوئية (أو العلاجية) التي لا يتأثر التصوير الضوئي ضمنها كثيراً بالامتصاص. يظهر من الشكل10.3، أن امتصاص نسيج معين للضوء يعتمد على كل من الطول الموجي والمكونات المختلفة للنسيج. يعد الهموغلوبين المؤكسج والهموغلوبين المنزوع الأكسجين من أكثر المكونات امتصاصاً للمجال المرئي وتحت الأحمر. غير أن قدرتهما الامتصاصية تكون أضعف ما يمكن بين الطولين الموجيين 650nm (الأحمر) و950nm (تحت الأحمر)، الأمر الذي يحدد النافذة العلاجية التي لا يتأثر ضمنها التصوير الضوئي.

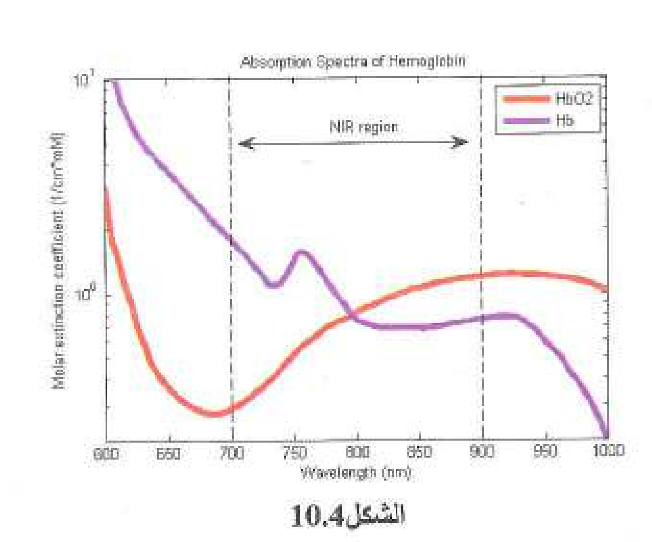


الشكل10.3. النافذة الضوئية (أو العلاجية) وتغير معاملات امتصاص أهم مكونات النسج الحية بدلالة الطول الموجي.

أما انتشار الضوء فيعود إلى عدم تجانس النسج وتعقيدها ضمن المقياس المجهري، الأمر الذي يعيق انتشار الأمواج الضوئية وفق خطوط مستقيمة إلاّ على مسافات متوسطة من مرتبة 20µm إلى 100µm وهي مِنْ ثَمَّ كثيراً ما تغير اتجاهها. ولهذا السبب لا نرى صورة عظم اليد بهذه الطريقة خلافاً لما هو الحال في الأشعة السينية، فالضوء البارز لا يرسم مسقطاً هندسياً للبنى الداخلية. ويعد نثر النسج للضوء المشكلة الرئيسية التي يجب التغلب عليها في التصوير بالضوء المنتثر.

10.4. بطاقة معامل الامتصاص

يمكن توصيف وتكمية كل من امتصاص النسج للضوء الذي يمر بها وانتثاره عنها **بمعاملات الامتصاص** والانتثار التي تعطي معلومات عن تلك النسج. يرتبط معامل امتصاص نسيج معين للضوء بتركيبه الكيميائي. غالباً ما تختلف النسج السليمة عن الورمية بترويتها أو بأكسجتها مثلاً ومِنْ ثَمَّ بلونها. يكون حاملا اللون الرئيسيان في النافذة الضوئية أي المركبتان الرئيسيتان اللتان

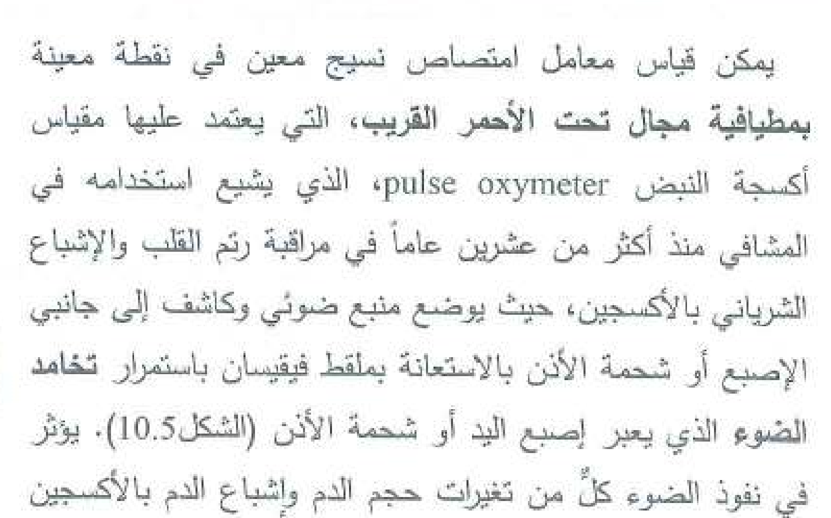


الشكل10.4

تحددان لون نسيج معين هما الشكلان المرجّع Hb والمؤكسَج HbO2 للهموغلوبين، اللذان يختلفان كثيراً بطيفي امتصاصهما (الشكل10.4). يسمح قياس معامل الامتصاص عند طولين موجيين، بإهمال حوامل اللون الأخرى، باستنتاج تركيز الهموغلوبين المؤكسج والهموغلوبين المنزوع الأكسجين.

أما فيما يتعلق بمعامل انتثار نسيج معين، فهو يرتبط ببنية ذلك النسيج وبخاصة كثافته، وأبعاد خلاياه وأشكالها. وإن قياس هذا المعامل أكثر تعقيداً وقلما يجري هذا القياس. لا يعتمد معظم نظم التصوير بالضوء المنتثر إلاّ على تغيرات معامل الامتصاص وتقوم بتقريب يتضمن ثبات معامل الانتثار. ومن الجدير بالذكر أيضاً أنه يمكن لخصائص ضوئية أخرى أن تكون مصادر للمعلومات وبخاصة انتثار الضوء اللامتناحي anisotropy scattering واستقطابه.

يمكن الحصول على صورة ضوئية للعضو المدروس بالضوء المنتثر من خلال وضع بطاقة ثلاثية الأبعاد لمعامل الامتصاص الضوئي (أو بالأحرى تغيراته بدلالة الزمن). ولكننا قبل الحديث عن التصوير، لنتحدث بتفصيل أكثر عن القياس الموضعي، في نقطة معينة لمعامل امتصاص نسيج معين.



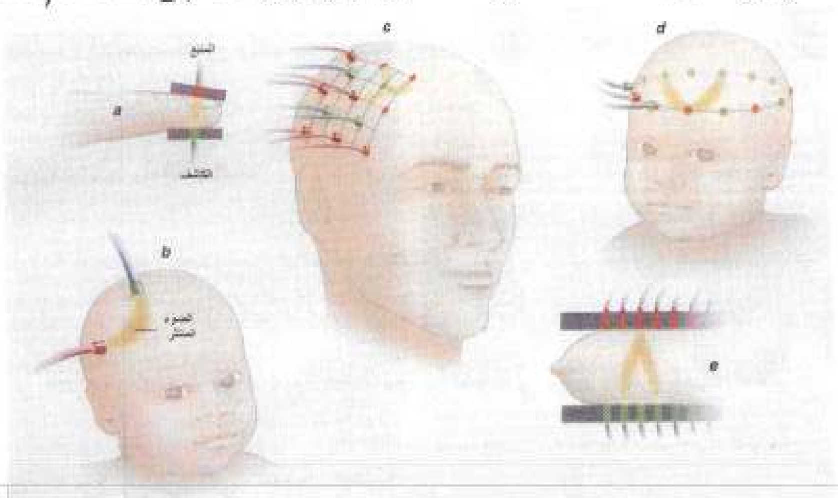
يمكن قياس معامل امتصاص نسيج معين في نقطة معينة **بمطيافية مجال تحت الأحمر القريب،** التي يعتمد عليها مقياس أكسجة النبض pulse oxymeter، الذي يشيع استخدامه في المشافي منذ أكثر من عشرين عاماً في مراقبة رتم القلب والإشباع الشرياني بالأكسجين، حيث يوضع منبع ضوئي وكاشف إلى جانبي الإصبع أو شحمة الأذن بالاستعانة بملقط فيقيسان باستمرار **تخامد الضوء** الذي يعبر إصبع اليد أو شحمة الأذن (الشكل10.5). يؤثر في نفوذ الضوء كلٌّ من تغيرات حجم الدم وإشباع الدم بالأكسجين



الشكل10.5. مقياس أكسجة النبض.

المرتبطَيْن بضربات القلب، أو بتغيرات أبطأ. ويستخدم لهذا الغرض طولان موجيان يختلف امتصاص كل من الهموغلوبين المؤكسج والهموغلوبين المنزوع الأكسجين لهما. وبشكل أدق يستعين مقياس الأكسجة بمنبعين ضوئيين يختلفان بطوليهما الموجيين. يمتص الهموغلوبين المنزوع الأكسجين في الحالة النموذجية أحد الطولين الموجيين 780nm بشكل أكبر، في حين يمتص الهموغلوبين المؤكسج الطول الموجي الآخر وهو عموماً نحو 830nm بشكل أكبر. وبمعرفة تغيرات شدة الضوء النافذ عند الطولين الموجيين يمكن تعيين تغيرات تركيز كل من شكلي الهموغلوبين. ثم نستنتج منها فيما بعد **تغيرات الإشباع الشرياني بالأكسجين** بالإضافة **إلى تغيرات حجم الدم.**

وقد تم تكييف هذه الطريقة التي تعتمد على قياس التخامد الموضعي للضوء مع الأعضاء الثخينة كعضلة الفخذ أو الثدي أو حتى رأس الوليد. من الجدير بالذكر أن مبدأ القياس بهذه الطريقة هو نفسه مهما اختلفت هندسة النسج: حيث تقاس **أكسجة النسيج بإضاءته بطولين موجيين أو أكثر**. تمتاز هذه التقنية في مطيافية المجال تحت الأحمر القريب بسهولة تنفيذها. حيث تقاس أكسجة الدماغ في حالة رأس الوليد مثلاً باستخدام ليفين ضوئيين يثبتان على الرأس، يأتي أحدهما بالضوء، في حين يلتقط الآخر، الذي يقع على بعد عدة سنتمترات، الضوء البارز ويوصله إلى الكاشف (الشكل10.6)، حيث يقوم الضوء بجس الثخانات الصغيرة للنسج (a) أو الثخانات الكبيرة (b) موضعياً. وبوضع شبكة من أزواج المنبع- الكاشف على العضو (c) نحصل على بطاقة للخصائص الضوئية للنسج القريبة من السطح. وفي حالة التصوير المقطعي الحجمي توضع أزواج المنبع- الكاشف على شكل حلقات (d) أو على شكل صفوف (e) .



الشكل10.6. استخدام الضوء المنتشر في القياسات الموضعية.

10.5. التصوير بالضوء الموسوم بالأمواج فوق الصوتية

يتم في التصوير بالضوء الموسوم (المكيف) بالأمواج فوق الصوتية Acousto-Optic imaging تكييف جزء من الضوء بنبضة فوق صوتية مبأرة في داخل النسيج الحيوي. يمكن تمييز الفوتونات الموسومة عن فوتونات الخلفية غير المكيفة ويمكن بسهولة التعرف على منشئها مباشرة من موقع الحزمة فوق الصوتية المبأرة. يمكن بناء الصور الثلاثية الأبعاد بتحريك الحزمة فوق الصوتية المبأرة. وقد تم ابتكار عدة جمل تستخدم كاشفاً واحداً.

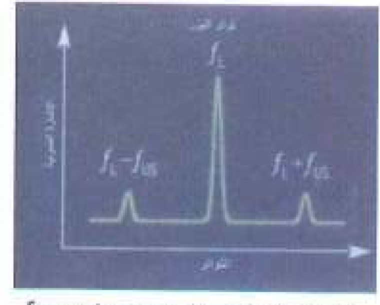
تعتمد المفعولات الضوئية الصوتية في وسط معين، عموماً، على تغير قرينة انكسار الوسط، بوجود أمواج صوتية فيه. حيث تولد الأمواج الصوتية شبكة قرائن انكسار في المادة، وما تراه الموجة الضوئية هو هذه الشبكة.

مبدأ التصوير الضوصوتي Acousto-Optic

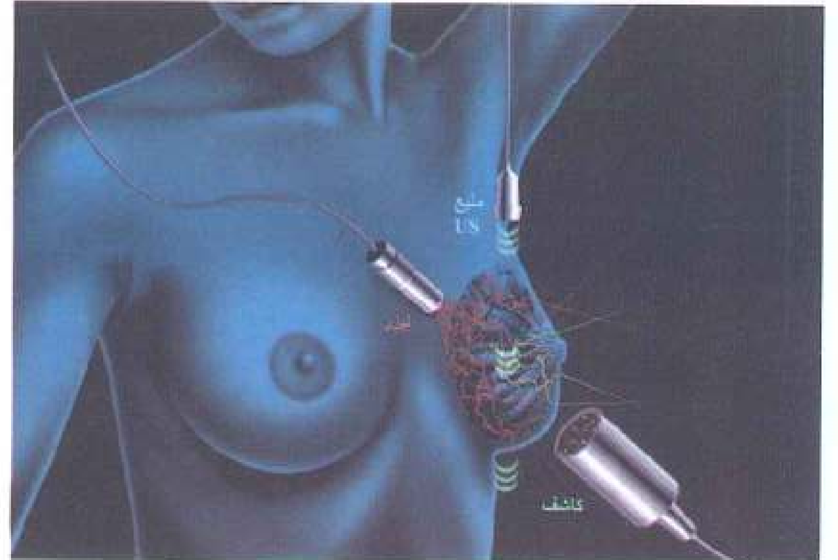
يمثل الشكل10.7 مبدأ التصوير الضوئي الصوتي AO imaging تخطيطياً. يضاء النسيج بضوء الليزر المترابط. ونظراً للطبيعة الانتثارية العالية للنسيج، يتولد حوله نموذج من البقع speckle field. تحرّض

نبضة فوق صوتية مبأرة في النسيج انزياحات دورية للناثرات scatterers (سعات من مرتبة بضعة نانومترات)، وتكييفاً لقرينة الانكسار ، في المنطقة البؤرية بشكل رئيسي. تكيف نتيجة لذلك مسارات الضوء التي تمر في المنطقة البؤرية. أخيراً تكيف شدة النموذج البقعي بالتواتر فوق الصوتي (الذي يقدر ببضعة ميغا هرتز). ترتبط سعة تكييف البقع مباشرة بالخصائص الضوئية للوسط في النقطة البؤرية فوق الصوتية. إذا كان الامتصاص الضوئي في النقطة البؤرية فوق الصوتية مرتفعاً عموماً، يكون احتمال هروب الضوء من هذه المنطقة منخفضاً؛ ومِنْ ثَمَّ يكون تكييف البقعة منخفضاً. وهكذا يمكن الكشف عن الاختلافات الموضعية في الامتصاص الضوئي للعينة.

ثمة صورة بسيطة تساعد في فهم مبدأ التصوير الضوصوتي تكمن في المنبع الافتراضي المكيَّف "virtual modulated source". تمثِّل منطقة النسيج التي يوجد فيها الضوء laser L والنبضة فوق الصوتية ultrasound pulse US في آن معاً منبعاً افتراضياً "virtual source"، أي منبعاً ضوئياً مكيَّفاً يمكن أن تمسح به العينة. فعندما تمسح به منطقة ماصة تنخفض شدته. يكون توزع الضوء في الوسط متجانساً تقريباً؛ وهكذا ينطبق المنبع الافتراضي على الحزمة فوق الصوتية. تعطى المقدرة الفاصلة المكانية لتقنية التصوير هذه بأبعاد المنطقة البؤرية فوق الصوتية (المقدرة الفاصلة العرضانية بضعة ملمترات والمقدرة الفاصلة الطولانية بضعة سنتمترات).



الشكل10.7b. المركبات الرئيسية التي يتضمنها الضوء البارز من العضو المستكشف.



الشكل10.7a. شكل تخطيطي لمبدأ التصوير الفوتوصوتي acousto-optic AO

يتضمن الضوء البارز من العضو المستكشف ثلاث مركبات رئيسية تختلف بتواتراتها: أكثرها شدة تقابل الضوء الحامل f_L وهي تقابل الفوتونات المنتثرة التي يتم التقاطها في غياب الأمواج فوق الصوتية، والمركبتان الموسومتان بالأمواج فوق الصوتية وهما $f_L + f_{US}$ و $f_L - f_{US}$.

يتم إصدار الحزمة فوق الصوتية المبأرة عمودياً على حزمة الضوء الوارد، بتواتر قدره 3 MHz. يتغير البعد البؤري إلكترونياً بإزاحات طورية ملائمة لصدور الموجة المحرّكة. يمكن لترجام الأمواج فوق الصوتية أن يصدر بنمطي الموجة المستمرة (CW) والنبضية pulsed. يسمح نمط الموجة المستمرة بالحصول على الصور الضوئية الصوتية AO (كما هو الحال بالترجام الأول). يقدّر معدل التكرار في النظام النبضي بنحو 1 kHz~. تحوي كل نبضة فوق صوتية في الحالة النموذجية دورين (مدتها نحو 0.7~ ميكروثانية عند التواتر 3MHz). يعمل الترجام أيضاً كمستقبل لأصداء النبضة. فهو يسجل أصداء النبضة وفق الحزمة فوق الصوتية المبأرة. بإجراء المسح الزاوي للمُصْدِر خطوة فخطوة وتكرار العملية نفسها في كل خطوة، يمكن إعادة بناء صور ثنائية البعد 2D للخصائص الصوتية للوسط. في النمط B mode، حيث تتحول سعة الصدى إلى شدة إضاءة brightness للبقعة على سلم الرماديات، نحصل على مقطع ثنائي البعد للوسط $4cm\times4cm \approx$ خلال نحو 0.1 sec. تسمح البرمجيات المناسبة بالمسح المتقطع للبؤرة فوق الصوتية على منظومة من المواقع المختارة سلفاً بالإضافة إلى إطارات مصوَّرة اقتناء CCD في كل من هذه المواقع الحصول على صورة كاملة للجسم المفحوص.

10.6. التصوير المقطعي بالترابط الضوئي



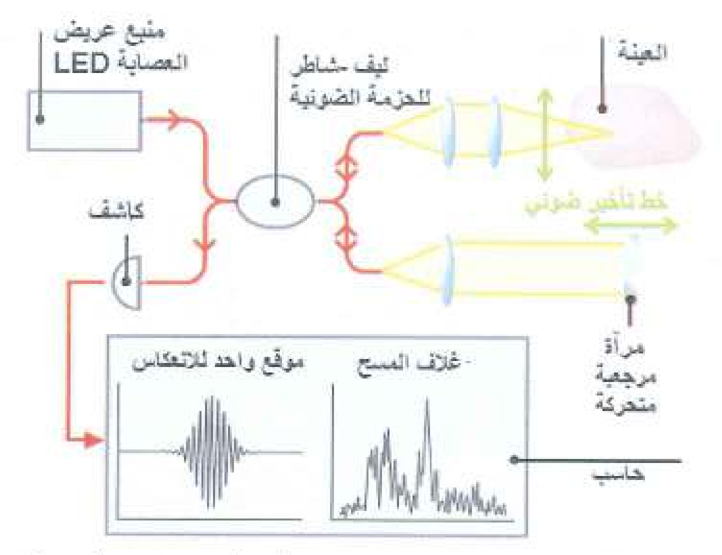
الشكل10.8. يستخدم تصوير الترابط الضوئي في العينية على نطاق واسع. نرى في الصورة أعلاه مريضة تخضع لفحص الشبكية. كما تظهر في الخلفية صورة لشبكية العين.

يمكن بالتصوير المقطعي بالترابط الضوئي أو OCT (Optical Coherence Tomography) دراسة عمق نسيج حيوي لا يمكن الدخول إليه كالشبكية مثلا (الشكل10.8). والـOCT نوع من تصوير الصدى الضوئي تحل فيه نبضات قصيرة من الضوء تحت الأحمر (10^{-15}s) محل الأمواج فوق الصوتية. يطلق

أحياناً على هذه الطريقة اسم الخزع الضوئي optical biopsy. تسمح هذه الطريقة بإظهار البنى الموجودة ضمن ثخانة من مرتبة الملمتر بمقدرة فاصلة يمكن أن تصل إلى المكرومتر، وذلك في الزمن الحقيقي والنسيج في موضعه ودون تماس، ومِنْ ثَمَّ دون أخذ خزعة ودون تحضير. يستخدم الـOCT في عيادات العينية حالياً، ويعد واعداً في تطبيقات عديدة في الجلدية والتوليد والقلبية ... إلخ.

وتعتمد الصورة الحاصلة على امتصاص النسج الحيوية لهذا الضوء وانعكاسه عنها. نظراً لقصر الأطوال الموجية للضوء يتم الكشف عن التفصيلات العرضانية للنسج (الاتجاه الذي يتعامد مع منحى انتشار الأمواج) بالمقدرة الفاصلة للمجهرية الضوئية والتي تزيد ألف مرة عنها في حالة التصوير بالأمواج فوق الصوتية. أما فيما يتعلق بالمقدرة الفاصلة الطولانية (وفق منحى العمق)، فهي تعتمد على قصر النبضات الضوئية المستخدمة. حيث يمكن باستخدام نبضات ليزرية فائقة القصر من مرتبة الفمتوثانية من حيث المبدأ تعيين عمق منطقة يأتي منها الصدى الضوئي بمقدرة فاصلة مكرومترية. إذْ لا يجتاز الضوء، عملياً إلاّ مكرومترين اثنين في النسيج خلال عشر فمتوثانيات.

وللحصول على صور مقطعية تستخدم حزمة ضوئية في مسح النسيج المدروس وفق المستوي الذي يخترقه الضوء. لقياس زمن ذهاب وإياب الأمواج الضوئية المنعكسة عن بنيات الجسم المكروية وشدة هذه الأمواج يجعل الضوء المنعكس عن الجسم يتداخل مع ضوء حزمة أخرى بعد قيامها باجتياز مسار ضوئي مرجعي معين (الشكل 10.9) باستخدام مقياس مايكلسون التداخلي (راجع الفقرة 3.3.2).



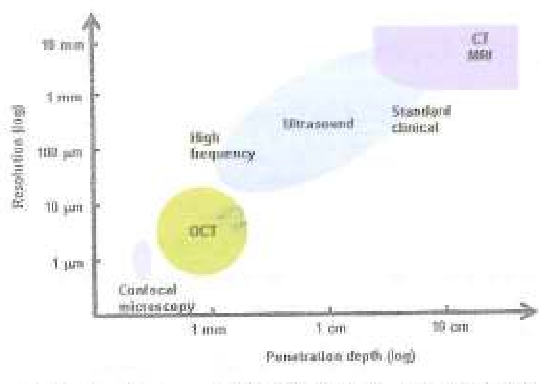
الشكل10.9. مقياس مايكلسون التداخلي ذو الألياف الضوئية يتم فيه تغيير فرق المسير الضوئي بالمرآة المرجعية بهدف الحصول على شكل للتداخل بدلالة العمق.

ولنذكر بأن المسار الضوئي بين نقطتين هو الطريق الهندسي الذي يمكن للضوء أن يقطعه في الخلاء خلال الزمن الذي يستغرقه بالانتشار بين هاتين النقطتين مضروباً بقرينة انكسار الوسط، ومِنْ ثَمَّ فإن فارق المسار الضوئي بين حزمتين صادرتين من المنبع نفسه يقيس إذاً شكلاً من التأخير الضوئي بين الحزمتين. تعتمد الطبيعة البناءة أو الهدامة للتداخلات التي تحدث لدى اجتماع الموجتين على هذا التأخير.

بتعبير آخر يقع معظم المسار الضوئي لكل ذراع داخل الألياف الضوئية، التي تتميز بقدرتها على الانحناء لدى اقترابها من النسيج الذي تجب دراسته، داخل الجسم مثلاً. ينقسم ضوء المنبع إلى قسمين يجتاز أحدهما المسار الضوئي المرجعي (الذهاب والإياب)، في حين ينعكس الآخر في النسيج المدروس قبل أن يعود ويتداخل مع الحزمة المرجعية. يجدر بالذكر أن التداخلات لا تحدث إلاّ إذا كان فرق المسير الضوئي بين ذراعي مقياس التداخل أقل من طول ترابط الضوء المستخدم $L = c / n\Delta f$، حيث c سرعة الضوء في الخلاء، وn قرينة انكسار الوسط، و Δf عرض الخط الطيفي الذي يقارب 20cm لليزر الهليوم النيون متعدد الأنماط و100m عندما يكون وحيد النمط.

تتكون الإشارة الواصلة إلى الكاشف من سلسلة من الأهداب التي تعتمد شداتها على البنيات المكروية التي تصادفها الحزمة. حيث يقابل كل بنية مكروية نهاية للشدة الضوئية تتسجل فيها الأهداب. يمكن بمعالجة هذه الإشارة الحصول على غلاف الأهداب _ المنحني حيث تتسجل فيه_ ومِنْ ثَمّ على مواقع النهايات ومنه أعماق البنيات التي تنشأ عنها. بتكرار العملية من أجل مختلف المواقع العرضانية للحزمة الضوئية نحصل في نهاية الأمر على صورة لمقطع عمودي على مستوي النسيج المدروس. تتحدد المقدرة الفاصلة المحورية (الطولانية) للصور كما ذكرنا أعلاه بطول ترابط المنبع الضوئي. باستخدام ليزرات نبضاتها فائقة القصر وعريضة الطيف (كليزر التيتانيوم سافاير أي الياقوت المشوب بالتيتانيوم) يمكن الحصول على مقدرة فاصلة محورية من مرتبة المكرومتر.

يشكل التصوير المقطعي بالترابط الضوئي حتى الآن الطريقة الوحيدة التي تبلغ مقدرة فاصلة من مرتبة أصغر من البعد الخلوي على عمق غير مهمل من مرتبة الملمتر. ومقدرتها الفاصلة أعلى منها في حالة الطرائق اللاضوئية (الشكل10.10) (كالإيكوغرافي والأشعة السينية وغيرها..) وهي قريبة منها في حالة المجهريات الضوئية العالية المقدرة الفاصلة. فضلاً عن أن التصوير المقطعي بالترابط الضوئي يتم من دون تماس، ويعتمد على الضوء تحت الأحمر المأمون بالنسبة للنسج الحيوية. ثمة ميزة أخرى لهذه الطريقة تكمن في عدم حاجتها لأي مستحضر تباين كالمستحضرات المجهرية التي يجب إدخالها في النسيج تحت طائلة تعديل وظائفها الحيوية.



الشكل10.10. المقدرة الفاصلة لمجموعة من تقنيات التصوير بدلالة العمق.

غير أن التصوير المقطعي للترابط الضوئي بتقديمه معلومات جديدة يكمل بالأحرى التقنيات الأخرى ولا يحل محلها. وهكذا تسمح الحساسية القصوى للـOCT (التي تعمل حتى لو كان عدد الفوتونات المنعكسة

عن نسيج معين يشكل فوتوناً واحداً لكل عشرة مليارات من الفوتونات) بالحصول على صور على عمق من مرتبة الملمتر، أفضل بكثير منها في حالة تقنيات المجهرية الضوئية ولكنها أدنى منها في حالة الطرائق اللاضوئية.

تستخدم هذه الطريقة في تشخيص وتعقب أمراض الشبكية مثل الغلوكوما glaucoma والثقوب الشبكية والتوذمات البقعية، وتنكس البقعة المرتبط بالعمر. وهي تسمح بكشف وتشخيص الأمراض في مرحلة مبكرة، قبل أن تظهر أولى الأعراض الفيزيائية ويصبح فقدان البصر لا عكوسياً. وقد أصبحت في خلال بضع سنوات تقنية شائعة في إظهار المورفولوجية الداخلية للشبكية بشكل مأمون وفي الزمن الحقيقي.

10.7. التقانة النانوية والفوتونيات Nanotechnology & Photonics

أحدثت التقانة النانوية، التي تتضمن ابتكار المواد والأنواع بأبعاد تقع بين 1nm إلى 100nm، مؤخراً ثورات مهمة في الفوتونيات الحيوية الطبية، وخاصة التحليل والتشخيص والمعالجة على المستوى الجزيئي والخلوي. وقد أدى الجمع بين التقانة النانوية الجزيئية والفوتونيات، إلى فتح المجال أمام إمكانية استخدام أدوات نانوية في الكشف عن الذرات والجزيئات وتداولها في مجموعة كبيرة من التطبيقات الطبية على المستوى الخلوي.

وقد قاد اقتران الفوتونيات بالتقانة النانوية إلى جيل جديد من الأدوات لجس الآليات الخلوية وإلقاء الضوء على عمليات حياتها الأساسية التي تحدث على المستوى الجزيئي. يمكن حالياً تعقب العمليات الكيمياحيوية في الأوساط داخل الخلوية في الجسم الحي باستخدام مجسات جزيئية متفلورة ومحسات نانوية. يمكن للعلماء اليوم أن يستكشفوا التفاعلات الفوتوكيميائية والبنيات دون المجهرية في الخلايا الحية بمقدرة فاصلة لم يسبق لها مثيل باستخدام أدوات مجهرية فعالة. يمكن حالياً ابتكار **حوامل نانوية للدواء تقترن أغلفتها بأجسام مضادة** antibodies لاستهداف مولدات الأضداد antigens والكروموفورات المتفلورة fluorescent chromophores للتعقب في الجسم الحي.

__الكروموفور أو حامل اللون__ A chromophore هو جزء من جزيء مسؤول عن لون الجزيء. ينشأ اللون عندما يمتص جزيء أطوالاً موجية معينة من الضوء المرئي ويمرر أو يعكس أطوالاً موجية أخرى. وحامل اللون هو منطقة في الجزيء، حيث يقع فارق الطاقة بين مدارين جزيئيين مختلفين ضمن مجال الطيف المرئي. ومن ثم يمكن للضوء المرئي الذي يسقط على الكروموفور أن يُمتص بإثارة إلكترون من حالته الأرضية إلى حالة مثارة.

__أما الفلورة Fluorescence__ فهي إصدار الضوء من مادة سبق لها أن امتصت الضوء أو أي إشعاع كهرطيسي آخر. وهي شكل من أشكال التألق. يكون للضوء الصادر، في معظم الحالات، طول موجة أطول ومن ثَمّ طاقة أخفض من الإشعاع الممتص. تحدث الأغلبية الساحقة لأمثلة الفلورة عندما يقع

الإشعاع الممتص في مجال الأشعة فوق البنفسجية من الطيف ومن ثَمَّ غير مرئي بالعين المجردة، في حين يقع الضوء الصادر في المجال المرئي.

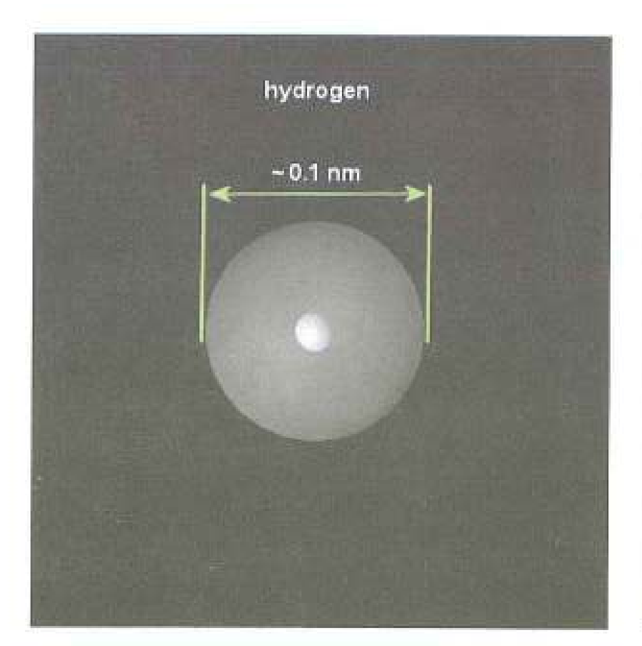
للفلورة تطبيقات عملية عديدة، بما فيها علم التعدين وعلم الجواهر والحساسات الكيميائية (مطيافية الفلورة) والوسم بالفلورة (عملية ربط جزيء فلورة بجزيء آخر كأن يكون بروتيناً أو حمضاً نووياً، ويتم هذا الأمر باستخدام مشتق تفاعلي للجزيء المتفلور، يرتبط اصطفائياً بمجموعة وظيفية موجودة في الجزيء الهدف)، والأصبغة والكواشف البيولوجية، والكشف عن الأشعة الكونية والمصابيح المتفلورة الأكثر شيوعاً. يغلب حدوث الفلورة أيضاً في الطبيعة في بعض الفلزات وفي مختلف الحالات البيولوجية في كثير من فروع المملكة الحيوانية.

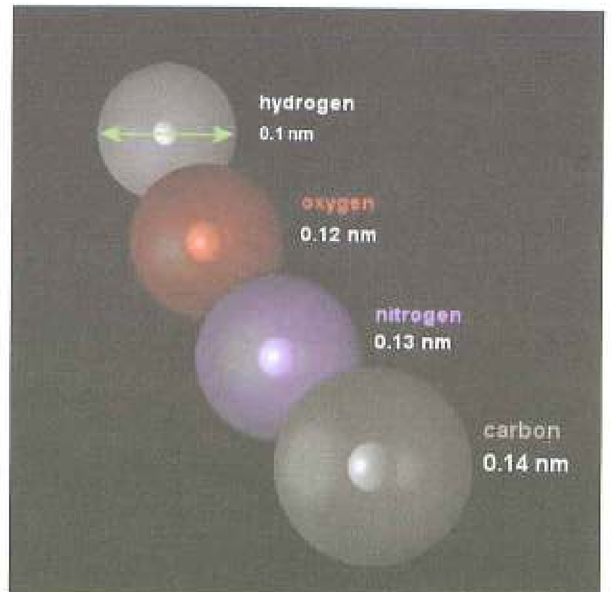
وقد قادت إمكانية تصنيع مكونات نانوية المقاس إلى ابتكار أدوات وتقنيات يمكنها أن تقيس برامترات أساسية على المستوى الجزيئي. يمكن بتقنيات الملقط الضوئي "Optical Tweezers" أسر جسيمات صغيرة بضغط الإشعاع في النقطة البؤرية لحزمة ضوئية عالية الشدة. كما يمكن استخدام هذه التقنية التي تدعى الأسر الضوئي "Optical Trapping," في تحريك خلايا صغيرة أو عضيات دون خلوية بحسب الرغبة باستخدام حزمة موجهة مبأرة. يمكن مثلاً لكرَيّة مغطاة بمجس حيوي فعال مقيد أن تدرج في نسيج أو حتى في خلية وأن يجري تحريكها في موقع استراتيجي بجملة أسر ضوئية. يمكن في هذه الحالة تحرير المجس الفعال حيوياً وتفعيله بالامتصاص المتعدد الفوتونات وفك القيد.

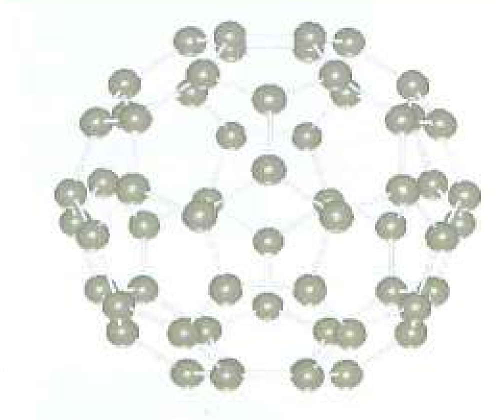
هذه التقانات النانوية ليست إلّا بعض الأمثلة عن جيل جديد من الأدوات الفوتونية النانوية التي يمكنها أن تغير جذرياً الفهم الأساسي لتطور الحياة. حيث يمكن لها أن تؤدي أخيراً إلى ابتكار تقنيات جديدة للتشخيص المبكر والمعالجة الطبية والوقاية فيما دون المستوى الخلوي إلى مستوى العضيّات الفردية حتى الدنا DNA حجر أساس الحياة.

10.7.1. العالم النانوي

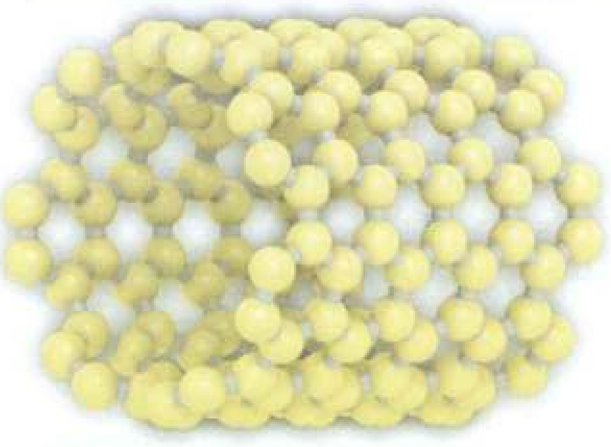
نتعرف على العالم النانوي، وفق الأبعاد، ببعض الأمثلة عن الجسيمات التي تتدرج في أبعادها من السلم النانومتري إلى السلم الجهري. تبدأ هذه الجسيمات من ذرة الهدروجين التي لايتجاوز قطرها 0.1nm، يليها كرية الكربون C_{60} ذات القطر 1nm مروراً بالدنا DNA عرض طاق واحد فيه 2nm وصولاً إلى نوعين من الجسيمات النانوية nanoparticles، يطلق عليهما اسم النقاط الكمومية quantum dots نظراً للخصائص الكمومية التي تبديها، يستخدم النوع الأول من النقاط الكمومية لخاصة إصدار الفلورة لدى تعرضها لحزمة ليزرية والقطر النموذجي للنقاط الكمومية المصدرة للضوء بنحو 5nm، والنوع الآخر لكريات من السيليس مغلفة بغشاء من الذهب قطرها 100nm مناسبة لتوليد الأمواج البلازمونية على سطحها تجاوباً مع تواتر ليزري يسلط عليها فترتفع درجة حرارتها لدى امتصاصه. يلي ذلك جسيمات متزايدة الأبعاد حتى الوصول إلى أحياء معروفة، (الشكل 10.11).



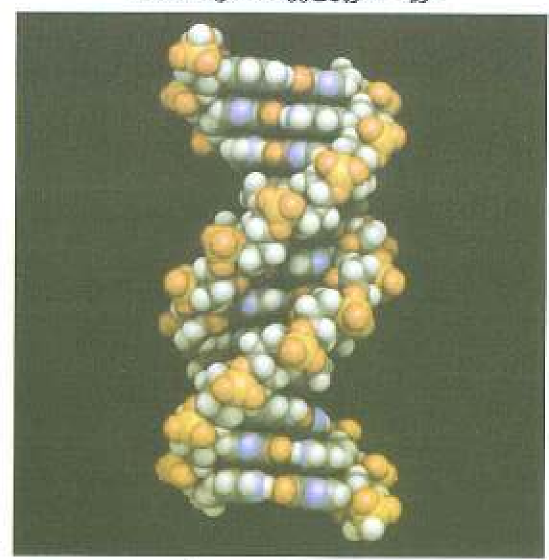




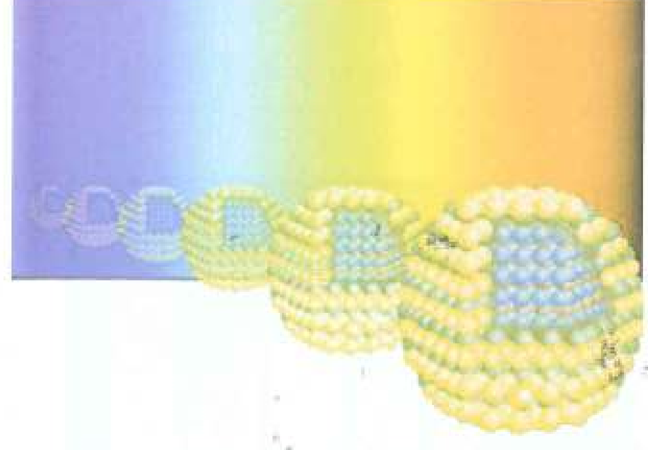
كرَية الكربون C_{60} قطرها 1nm.



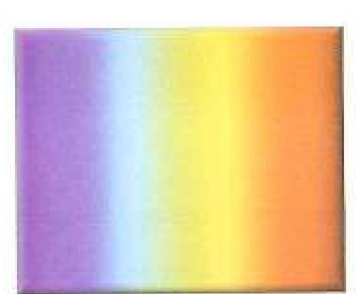
أنبوب كربون نانوي أحادي الجدران قطره 1.3nm.



الـDNA عرض طاق واحد فيه 2nm.

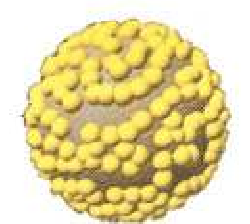


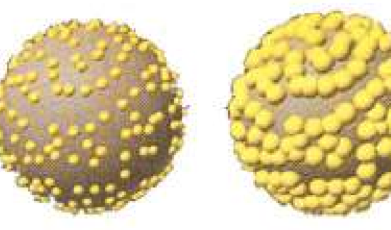
جسيمات نقاط كمومية تصدر ضوءاً لدى إنارتها بمنبع طاقي. يتعلق طول موجة الضوء الذي تصدره نقطة كمومية بأبعادها. يقدر القطر النموذجي للنقاط الكمومية المصدرة للضوء بنحو 5nm.



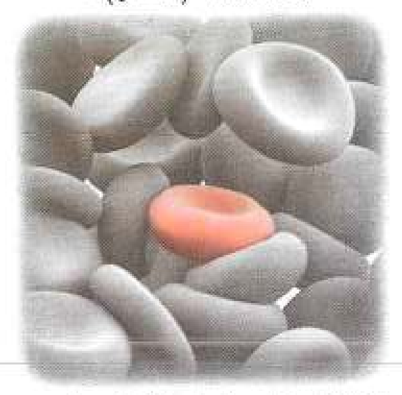
المجال المرئي من طيف الإشعاعات الكهرطيسية، يتضمن الأطوال الموجية الواقعة بين 400nm (الأزرق) و 700nm (الأحمر).







كرية من السيليس مغلفة بغشاء من الذهب قطرها 100nm، يمكن إذا تعرضت لطول موجة ليزرية مناسب أن يتولد على سطحها أمواج بلازمونية (أمواج كثافة إلكترونية) ترفع درجة حرارته إلى $45^{o}C$.



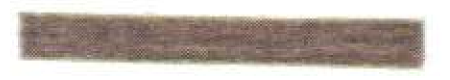
يبلغ القطر الوسطي لخلية الدم الحمراء بين 6µm و 8µm.



يبلغ طول بكتريا العصية الإيشريشية 2µm. يظهر في الشكل عنقود منها مكبرة 10,000 مرة .



الطول المتوسط لذبابة منزلية 1cm.



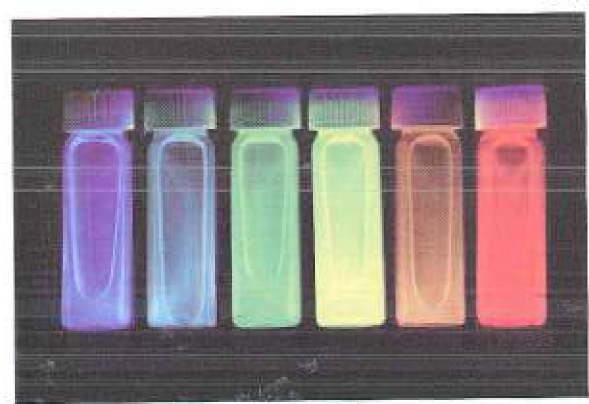
عرض شعرة الإنسان 75µm.



الشكل 10.11

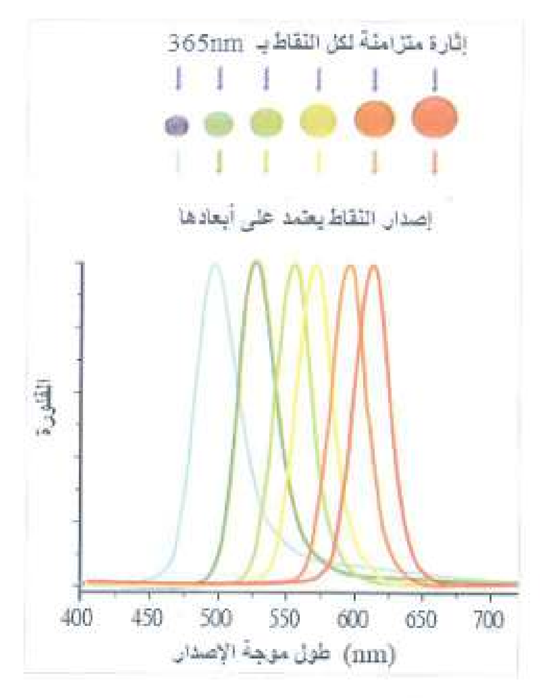
5.7.2. النقاط الكمومية والتحليل الجرثومي

يمكن بإثارة النقاط الكمومية التي تقدر أقطارها من 2nm إلى 5nm بالطول الموجي 365nm أن تصدر الفلورة الزرقاء عن النقاط 2nm، والخضراء عن 3nm~ والصفراء عن 4nm~ والحمراء عن النقاط الأكبر 5nm~. فإذا ما وضِعت أضداد لجراثيم معينة على هذه النقاط، بحيث يوضَع ضدٌّ لجرثوم معين



الشكل 10.11. الفلورة الصادرة من النقاط الكمومية.

على نقاط بقطر معين فإنه يمكن باستخدام مجموعة من هذه النقاط الموسومة بالأضداد الكشف عن وجود جرثوم معين في عينة لدى إضاءتها بليزر الإثارة، إذ لن يتفلور من النقاط الكمومية إلّا تلك التي وجدت المستضد الذي تحمل أضداده (الشكلان 10.11 و 10.12) .



الشكل10.12. تعتمد أطياف الفلورة التي تصدرها النقاط الكمومية لدى إثارتها بمنبع طاقي على أبعادها. يتعلق طول موجة الضوء الذي تصدره نقطة كمومية بأبعادها. يقدر القطر النموذجي للنقاط الكمومي المصدرة للضوء بنحو 5nm.

10.7.5. الفسفرة

الفسفرة Phosphorescenceنوع خاص من التألق الضوئي يرتبط بالفلورة. لكن المادة التي تبدي الفسفرة، خلافاً للفلورة، لا تعيد فوراً إصدار الإشعاع الذي تمتصه. بل تترافق بسلالم زمنية أبطأ لإعادة الإصدار نتيجة انتقالات لحالات طاقية ممنوعة في الميكانيك الكمومي. ولأن هذه الانتقالات تحدث ببطء شديد في بعض المواد، يمكن أن يعاد إصدار الإشعاع الممتص بشدة أضعف لمدة تصل حتى عدة ساعات بعد الإثارة. من الأمثلة على المواد المتفسفرة التي تشيع رؤيتها الألعاب التي تتألق في الظلام، والطلاءات، وعقارب الساعة التي تتألق لبعض الوقت بعد إثارتها، بضوء أبيض، كضوء القراءة أو ضوء الغرفة العادي. يتضاءل التألق عادة تدريجياً خلال دقائق (أو يمكن أن يصل إلى بضع ساعات) في غرفة مظلمة.

10.7.3. الفلورة والكشف عن الأورام بالفلورة

يمكن الكشف عن الأورام بتعريضها عملياً لإشعاع منابع ليزرية يتكون وسطها الفعال من صباغ منحل في محل يمكن تكييف طوله الموجي مع القيمة المطلوبة، وتقدر استطاعتها بنحو 2Watt. ويستمر التعرض لإشعاع الليزر لبضع عشرات الدقائق، فإذا صادف وجود مواد متحسسة لضوء الليزر في الورم كالهيماتوبرفرين الذي يمتاز بإصدار إشعاع الفلورة ، فيمكن إظهار وجود أورام صغرية في وقت مبكر جداً مقارنة بالطرائق التقليدية (إلى جانب النتائج الواعدة للمعالجة الفوتوديناميكية التي تقوم بالاستفادة من خاصة الامتصاص لتخريب الورم). كما يمكن للفلورة داخلية المنشأ (الذاتية) المتحرضة بالليزر في مختلف الأصبغة الطبيعية للنسج أن تسهم في تعيين هوية هذه النسج. وهي تمتد في مجال عريض من الأطوال الموجية، وتقع نهايتها العظمى عند الأزرق المخضر في الحالة التي يصدر فيها الليزر في المنطقة البنفسجية أو المنطقة فوق البنفسجية. إن الفلورة الذاتية في الخلايا الورمية أضعف منها بكثير في

حالة الخلايا السليمة، وهي تهبط إلى النصف في أورام القصبات، وأضعف بعشرين مرة أو أكثر في حالة أورام المثانة. أما بوجود مستحضر للفوتونات فيمكن الاعتماد على زيادة الفلورة النوعية العائدة لهذا المتحسس بالنسبة إلى الفلورة الذاتية لتحسين التباين بين الخلايا الورمية والخلايا السليمة.

ولهذا يكفي تقسيم شدة الخطوط العائدة للمتحسس وحده على شدة الفلورة الذاتية. ولأن كلاً من شدتي الفلورة يتناسب طردياً مع الإضاءة الليزرية، تمتاز هذه الطريقة بإعطاء إشارة مستقلة عن الشدة الضوئية وعن طريقة إضاءة الورم وعن حالته السطحية ...إلخ. وبذلك يصبح التشخيص مستقلاً عن العوامل التي يصعب التحكم فيها سريرياً.

يمكن الاعتماد على خصائص إصدار الفلورة عند مختلف الأطوال الموجية كذلك لإعطاء الورم صورة عالية التباين. ولهذا ابتكر في السنوات الأخيرة نظام يشكل عدة صور لمنطقة الورم، يوافق كل منها لوناً مختلفاً ثم تعالج مختلف الصور بالحاسب، ويجمع فيما بينها للحصول على منظر نهائي تكون الحدود فيه بين الورم والنسيج السليم واضحة تماماً.

10.7.4. التصوير بالفوتونات المتعددة

إن الاعتماد على الإثارة ببضعة فوتونات للانتقال من مستوى أول إلى مستوى ثانٍ مكان الفوتون الواحد له عدة مزايا. ففي الحالة العادية يشكل منبع ضوئي معين صوراً مميزة لأنه يثير واسمات نوعية: ملوّنات خاصة أو جزيئات طبيعية، تمتص الضوء، ثم تعود فتصدره (وهو مبدأ الفلورة). إن استخدام الضوء الطويل الطول الموجي في التصوير مفيد، لأن طاقة الفوتونات تكون أخفض بحيث لا يثار الجزيء الواحد إلاّ عند اصطدام عدة فوتونات في آن معاً. لا تظهر هذه الإثارة المتعددة الفوتونات إلاّ عند الكثافات العالية وهذا متوفر في الليزر.

إن الليزرات ذات النبضات الفائقة القصر تكفل الشدات المطلوبة، بتحرير استطاعة وسطية ضعيفة إلى حد كاف لتجنب إتلاف النسج. فضلاً عن أن الأطوال الموجية الطويلة تخترق النسج بشكل أفضل. وإضرارها بالخلايا أقل منه في حالة الأطوال الموجية الأقصر. على غرار الصناعة المكروية العالية الدقة، يتم الحصول على مقدرة فاصلة أفضل بضبط الشدة بحيث لا تحدث الفلورة إلاّ في النقطة البؤرية للحزمة. تولد هذه التقنية صوراً ثلاثية الأبعاد للنسج الحية بوضوح ودقة ليس لهما مثيل.

يعتمد التصوير بأشعة التيراهرتز، الذي أفرد له فصل خاص نظراً لحداثته وتطوره السريع، على الإشعاع الذي يقع طوله الموجي بين 15μm والملمتر للاستفادة من هذه المميزات.

الفصل الحادي عشر

تطبيقات الليزر

Laser Applications

الامتصاص وآليات تفاعل الإشعاع مع النسج

11.1. تمهيد

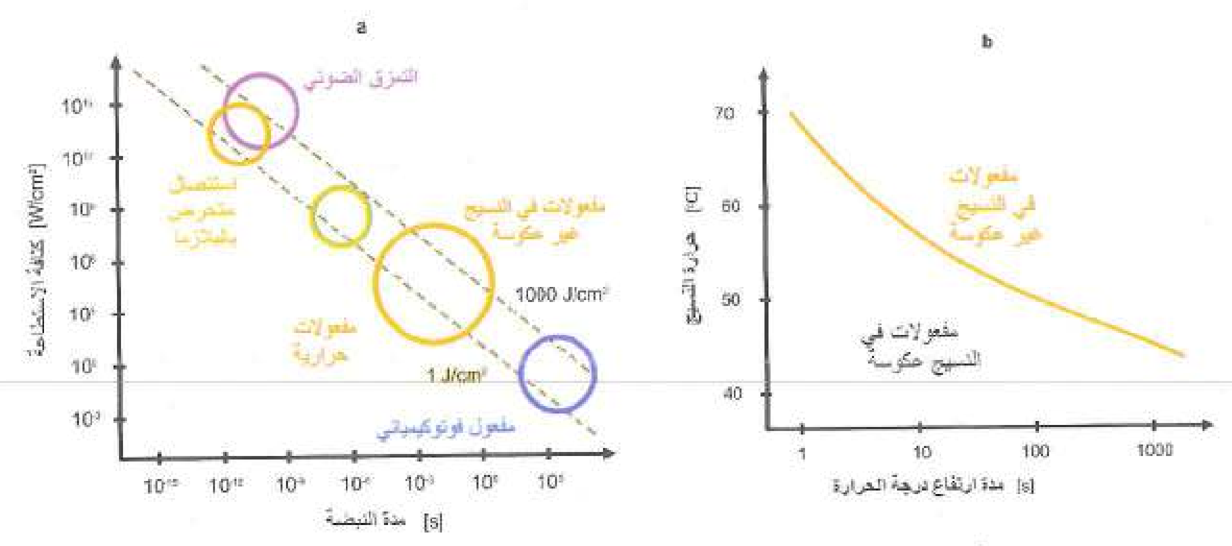
إن التأثيرات التي تنجم عن فعل إشعاع الليزر في النسج الحيوية، كثيرة ومتنوعة بقدر تنوع كل من الخصائص الضوئية للنسج والبرامترات الليزرية. من أهم خصائص النسج الضوئية معاملات الانعكاس والامتصاص والانتثار التي وردت في الفقرة 9.7. وهي تحدد أيضاً النفوذية الكلية للنسيج عند طول موجي معين. نضيف هنا الخصائص الحرارية للنسج– كالنقل الحراري والسعة الحرارية. ومن جهة الليزر يعطى كل من الطول الموجي لإشعاعه ومدة التعرض والطاقة المطبقة وأبعاد البقعة البؤرية وكثافة الطاقة وكثافة الاستطاعة. وتعدّ مدة التعرض من أهم هذه الخصائص لدى انتقاء نوع معين من التأثر، كما سنرى.

تصنف تأثيرات تفاعل الليزر مع المادة الحية حالياً في خمسة أنواع رئيسية. وهي التأثرات الفوتوكيميائية photochemical interactions والتأثرات الحرارية thermal interactions والاستئصال الضوئي photoablation والاستئصال المتحرض بالبلازما plasma-induced ablation والتمزق الضوئي photodisruption. نقوم في هذه الفقرة بتوصيف كل من هذه الآليات بإيجاز ومراجعة المبادئ الفيزيائية التي تتحكم بهذه التأثرات. وقد أُكِّدَت الآليات المجهرية التي تتحكم بمختلف عمليات تحويل طاقة الليزر لتنفيذ الغرض المطلوب.

تشترك هذه التأثرات فيما بينها بوقوع مجال كثافة الطاقة المميز بين $1\ J/cm^2$ إلى $1000\ J/cm^2$، ولو أن كثافة الاستطاعة نفسها تتغير قيمتها بأكثر من 15 مرتبة! ومِنْ ثَمَّ فإن برامتراً واحداً يميز هذه العمليات ويتحكم فيها بشكل رئيسي: هو مدة التعرض لليزر التي تطابق بشكل رئيسي زمن التأثر نفسه.

تظهر في الشكل11.1 خارطة مضاعفة اللغارتمية تتضمن أنواع التأثرات الأساسية الخمسة، على النحو الذي وجدت فيه في تجارب متعددة. يعبر محور التراتيب عن كثافة استطاعة الليزر المطبقة irradiance مقدرةً بـ W/cm^2. في حين يمثل محور الفواصل مدة التعرض بالثواني. يدل القطران المتوازيان في الشكل على كثافات ثابتة للطاقة المتوضعة عند $1\ J/cm^2$ و $1000\ J/cm^2$ على الترتيب.

يمكن لمقياس الزمن وفقاً لهذه الخارطة، أن يقسم تقريباً إلى خمسة أجزاء: الموجة المستمرة أو زمن التعرض أكبر من الثانية في حالة التأثرات الفوتوكيميائية، ومن دقيقة إلى مكروثانية للتفاعلات الحرارية، ومن المكروثانية إلى النانوثانية في حالة الاستئصال الضوئي، وأصغر من النانوثانية في حالة الاستئصال المتحرض بالبلازما والتمزق الضوئي. يعزى الاختلاف بين هذين الأخيرين إلى الاختلاف بين كثافتيهما الطاقيتين. إذْ يعتمد أحدهما كلياً على التأيين بينما الآخر أثر مرافق، ولكنه مفعول ميكانيكي بشكل رئيسي. فالبلازما هي وسط فيه كثافة الإيونات الموجبة والسالبة (الإلكترونات مثلاً) أكبر من كثافة الإيونات المعتدلة.



الشكل11.1. خارطة لتأثرات الليزر- نسيج (a) تمثل الدوائر مجالات خمس آليات تقريباً لتأثر الليزر مع النسيج. إن البرامتر الرئيسي الذي يتحكم بآلية التأثر هو مدة النبضة (التي ترتبط بكثافة الاستطاعة)، في حين أن الطاقة الكلية المتوضعة تكون أقل أهمية وتقع عادة بين 1J و1000J. (b) منحني المفعولات الحرارية غير العكوسة، إذْ تكون مدة استمرار درجة الحرارة المرتفعة مهمة أيضاً. يقدر الخط الأحمر على أنه درجة الحرارة الحرجة الفاصلة.

يظهر الشكل 11.2 أن كثافة الطاقة الكلية المتعلقة بتطبيقات الليزر الطبية تمتد من نحو $1\ J/cm^2$ إلى $1000\ J/cm^2$. تدل العلاقة العكسية بين كثافة الاستطاعة ومدة التعرض بوضوح على أن كل أنواع التأثرات التي يطلب إجراؤها تتطلب كثافة الطاقة نفسها تقريباً. ومِنْ ثَمَّ تبدو مدة التعرض البرامتر الرئيسي المسؤول عن أنواع آليات التأثر.

لا يمكن دائماً الفصل بدقة بين أنواع التأثر المتجاورة. إذ يمكن للمفعولات الحرارية أن تؤدي دوراً مهماً في أثناء التأثر الفوتوكيميائي. حتى إن النبضات الليزرية الفائقة القصر التي تكون مددها أقصر من 100 ps – التي ليس لأي منها مفعول حراري محسوس– يمكن، إذا تم تطبيقها بمعدلات تكرار أعلى من نحو 10 إلى 20 Hz تبعاً لليزر، أن تترافق بارتفاع في درجة الحرارة يمكن قياسه. يكشف هذان المثالان حاجتنا

لمعرفة أفضل لكل تأثر بين الليزر والنسيج. تصبح هذه المهمة أكثر صعوبة بفعل لا تجانسية معظم النسج والتي لا يمكن تغييرها. غير أنه يصبح ممكناً الوصول إلى الفيزياء الأساسية التي تتدخل في كل تآثر لدى جمع قدر كاف من البيانات لتنسجم مع البرامترات غير المعروفة.

11.2. التآثر الفوتوكيميائي

تنشأ مجموعة التآثرات الكيميائية تبعاً للملاحظات التجريبية من إمكانية الضوء على تحريض مفعولات وتفاعلات كيميائية ضمن الجزيئات الضخمة أو النسج. تؤدي آليات التآثر الفوتوكيميائية، في هذا المجال من فيزياء الليزرات الطبية، دوراً مهماً في المعالجة الفوتودينميكية photodynamic therapy (PDT). تحدث التآثرات الفوتوكيميائية عند كثافات للاستطاعة منخفضة جداً (في الحالة النموذجية $1W/cm^2$) ومدد تعرض طويلة تمتد من ثوان إلى موجة مستمرة.

الشكل11.2. تعتمد الطاقة المتوضعة في الخلايا (الجرعة الطاقية) التي تقاس بالجول على السنتمتر المربع (J/cm2)، على استطاعة الليزر نفسها ومدة تعرض الخلية للضوء. (تمثل الخطوط القطرية المتوازية المنقطة جرعات الطاقة المختلفة). وقد ألقينا الضوء على بعض المفعولات التي يمكن حدوثها باجتماعات مختلفة للاستطاعة وزمن التعرض. يشيع بعض التسخين على الأقل في مجال واسع من الطاقات (الأحمر). أما الأحمر الداكن فحيث تكون الحرارة هي الآلية السائدة.

11.2.1. المعالجة الفوتودينميكية

المفعولات الفوتوكيميائية

وهي المفعولات المرتبطة بالامتصاص الاصطفائي للضوء، الذي تقوم به في معظم الأحيان إحدى الركائز المكونة للخلية ليبدأ بعض التفاعلات الكيميائية، وتتجلى إما بإتلاف الخلايا الخبيثة مباشرة وإمّا على مراحل متعددة، وفي هذه الحالة يطلق على هذا التأثير اسم المفعول الفوتودينميكي. وتعتمد على حقن متحسس ضوئي يمتاز بتفضيله التثبت على الورم: وجزيئاته قادرة على امتصاص الضوء المقابل بفعالية كبيرة. وهذا ما يحملها إلى حالات مثارة، ثم تعود بسرعة كبيرة نحو حالات طاقاتُها أخفض مع تشكيل نواتج سامة تقتل الخلايا الخبيثة، وهنا تكمن الفائدة الرئيسية من هذه العملية.

للمواد المتحسسة بالضوء تاريخ طويل في الطب، وقد اكتشف قدماء المصريين علاجاً يربط بين تناول النباتات التي تحوي الصدافولين psoriasis والتعرض لضوء الشمس في حالة البهق* vitiligo. وهو يستخدم حالياً في معالجة الصداف.

يتوافر حالياً العديد من المتحسسات الضوئية التي تتمركز في النسج المريضة كالأكريدين**والأيوزين والفلوروسئين والتتراسكلين والكبريتات والبربرين، وأهم هذه المواد البرفرينات التي تتمركز في النسج المريضة أكثر من النسج السليمة.

ثمة مركب للبرفرين وهو مشتق الهماتوبرفرين HPD يمتاز بالتثبت على الورم والكشف عن وجوده بالفلورة الحمراء وبتحريض التموُّت بعملية فوتودينميكية. ويستخدم حالياً في معالجة مختلف الأورام الخبيثة (في الرئة أو المثانة أو المري).

ولفهم آليات المعالجة الفوتودينميكية بالاعتماد علىHPD في حالة السرطانات، يجب فحص الخصائص البارزة للجزيئات، فهي قادرة على امتصاص الضوء في مجال واسع من الأطوال الموجية. تقع أول نهاية عظمى للامتصاص عند الطول الموجي $(\lambda = 400\,nm)$. غير أن هذا الموقع يوافق نهاية امتصاص لهموغلوبين الدم وغير ملائمة كثيراً لمعالجة الأورام. كما تتوافر نهايات عظمى عديدة يقع آخرها عند الطول الموجي $(\lambda = 630\,nm)$ وهو طول موجي ينخفض عنده امتصاص الهموغلوبين بشدة. ويختار ليزر عند هذا الطول الموجي لتشعيع HPD المتمركز في الورم؛ لأن هذا الطول الموجي هو الذي يضمن أكبر عمق للاختراق.

إن امتصاص جزيئات الـ HPD للفوتونات ينقلها إلى حالات مثارة، إذْ يمكنها أن تفقد طاقة الإثارة بإصدار إشعاعات فلورة مميزة حمراء تحوي خطين طيفيين. وهذا الضوء دليل فعلي على الخلايا التي قامت بتثبيت جزيئات الـHPD أي على الخلايا الورمية. إذا كان هذا الشكل لزوال الإثارة يضمن تشخيصاً شديد التأثير بالأورام، فإن الطريق الآخر الذي تسلكه كذلك من وقت لآخر لتسقط ثانية على الحالة الأساسية هو الذي يحرض التموُّت.

إن إتلاف الخلايا الخبيثة بالأكسجين الجزيئي المثار الناتج في داخل الورم نفسه هو أساس المعالجة الفوتودينميكية التي تستخدم في مراكز عديدة في العالم لمعالجة سرطانات الجلد.

إن المعالجة الفوتودينميكية يمكن أن تكون مفيدة أيضاً في إكمال طرائق العلاج الأخرى بتطبيقها في تنظيف مكان الورم بعد العملية لإزالة آخر الخلايا الخبيثة.

---

* البهق : مرض جلدي يرتبط بعوز في التصبغ ويتصف بظهور بقع بيضاء على الجلد.

** الأكريدين : مركب تصنع منه الأصباغ والعقاقير.

11.3. التفاعل الحراري (التآثر)

يتضمن مصطلح التفاعل الحراري مجموعة كبيرة من أنواع التفاعل، إذْ يكون التزايد في درجة الحرارة الموضعية هو التغير البرامتري الملحوظ. يمكن أن تتحرض المفعولات الحرارية إما بموجة مستمرة وإمّا بإشعاع ليزر نبضي. في حين يتحكم بالعمليات الفوتوكيميائية غالباً مسار تفاعل محدد، فإن المفعولات الحرارية تسعى عموماً لأن تكون لانوعية وفقاً لما توصل إليه الباحثان باريش ودويتش 1984. غير أنه تبعاً للمدة وقيمة ذروة درجة الحرارة التي يبلغها النسيج، يمكن تمييز مفعولات مختلفة كالتخثر coagulation، والتبخر vaporization، والتفحم carbonization، والانصهار melting.

التخثر. حيث يبدو النسيج المتخثر داكناً مقارنة بالنسيج السليم، في أثناء عملية التخثير يمكن أن ترتفع درجة الحرارة إلى 60 درجة مئوية، ويصبح النسيج المتخثر متموتاً.

التبخر. يحدث التبخر في أثناء عملية استئصال تجري على السن مثلاً، إذْ تزال طبقات كاملة منه مخلفة بنيات شبيهة بالدرج. يعود هذا الأمر إلى وجود ما يدعى خطوط ريتسزيوس striae of Retzius وهي طبقات عالية المحتوى من جزيئات الماء. حيث يمتص الماء طول موجة الإيربيوم ياغ بشدة عند 2.94μm مما يؤدي إلى تبخر هذه الطبقات. ويؤدي التزايد المتحرض في الضغط – حيث يسعى الماء للتمدد بالحجم– إلى انفجارات مكروية متوضعة. يذكر في الأدبيات أحياناً على أنه مفعول ميكانيكي حراري ناجم عن تزايد الضغط المعني. يدعى الاستئصال الناتج التحلل الحراري thermal decomposition، ويجب تمييزه من الاستئصال الضوئي.

التفحم. يحدث التفحم مثلاً لدى معالجة الورم metastases بغاز CW CO^2 حيث تطبق في هذه الحالة كمية كبيرة من الحرارة ويحدث التفحم. حيث تزداد درجة حرارة النسيج المعرَّض الموضعية بشكل كبير. وفي درجات أعلى من الدرجة 100°C يبدأ النسيج بالتفحم أي يتحرر الكربون، مؤدياً إلى اسوداد اللون. في تطبيقات الليزر الطبية يجب تجنب التفحم بأي طريقة لأن النسيج يصبح متموتاً في درجات حرارية أخفض. وبذلك فإن التفحم يخفض فقط الرؤية في أثناء الجراحة.

الانصهار. يحدث الانصهار مثلاً لسطح سن لدى تعرضه لمئة نبضة من ليزر Ho:YAG. ولحدوث الانصهار لا بد أن تصل درجة الحرارة إلى بضع مئات الدرجات المئوية في حالة مادة السن التي تتكون بشكل رئيسي من hydroxyapatite، وهو مركب كيميائي من الكالسيوم والفوسفات. وأن مدة النبضة التي تقدر ببضع مكروثانيات ما تزال طويلة إلى حد يكفي لحدوث ارتفاع كاف في درجة الحرارة لأنه يطبق معدل تكرار يقرب من 1Hz وهو منخفض للغاية.

تعد درجة الحرارة بالتأكيد البرامتر الذي يتحكم بكل تفاعلات الليزر مع النسيج الحرارية. يعتمد الامتداد المكاني لتلف النسيج ودرجته على مقدار الحرارة المتوضعة في النسيج ومدة التعرض للطاقة ومكانها. غير أنَّ توضيع طاقة الليزر لا يعتمد على برامترات الليزر كطوله الموجي وكثافة استطاعته ومدة التعرض وأبعاد البقعة ومعدل التكرار فحسب بل يعتمد أيضاً بشدة على الخصائص الضوئية للنسيج كمعاملات الامتصاص والانتثار.

في النسيج الحيوي، يحدث الامتصاص بشكل رئيسي بفعل وجود جزيئات الماء الحرة والبروتينات والأصبغة وجزيئات ماكروية أخرى. ويعتمد معامل الامتصاص بشدة على طول موجة إشعاع الليزر الوارد. تؤدي جزيئات الماء في التفاعلات الحرارية دوراً مهماً. يكون معامل امتصاص الماء في المجال المرئي صغيراً للغاية. في هذا الجزء من الطيف وفي الأشعة فوق البنفسجية يكون امتصاص النسج أعلى وذلك تبعاً للمحتوى النسبي من الجزيئات الضخمة مثل الميلانين والهموغلوبين. غير أن جزيئات الماء تكون هي الماصات السائدة في المجال تحت الأحمر، لأن معامل امتصاصها يزداد عدة مراتب فيه.

يضاف إلى برامترات الليزر التي تتحكم في توضيع الطاقة الخواص الحرارية للنسيج، مثل برامترات انتقال الحرارة كالناقلية الحرارية والسعة الحرارية. وتتعين درجة الحرارة التي يمكن بلوغها في المفعولات الحرارية على نوع النسيج.

11.4. الاستئصال الضوئي photo-ablation

وهو المفعول الفوتوكيميائي اللاحراري، وينتج بخاصة عند منابع الليزر فوق البنفسجية النبضية (الإكسايمر). فهو يعتمد على قطع الروابط الكيميائية مباشرة وفصمها عن النسيج. وتفيد هذه المعالجة بخاصة في حالة الشرايين التاجية؛ لأن منابع الليزر التي تؤثر بالمفعول الحراري تحرض توذماً شريانياً، لا يحصل في حالة الاستئصال الليزري فوق البنفسجي. وقد جرت معالجة المئات من المرضى بهذه الطريقة من أمراض الشرايين التاجية.

وهو يستخدم في المعالجة الجذرية لإصابات التصلب العصيدي. ويعتمد في هذه الحالة، كما في حالة الأورام على الدلالة الطيفية للمناطق المريضة في التعرف عليها. ويسهم الليف الضوئي نفسه حينئذٍ في حمل الحزمة التشخيصية (التي يصدرها ليزر الآزوت مثلاً) وحزمة المعالجة (ليزر الإكسايمر). وتكون شدة الحزمة الأولى أخفض بكثير من شدة الثانية لتجنب الإضرار بالنسج خلال مرحلة التشخيص.

وقد ظهر أن الفلورة الذاتية للنسج تكشف بعد تعرضها لإشعاع نبضة ليزرية عن الخط الفاصل بين إصابات التصلب العصيدي فيها والجدر غير المصابة. وقد كان الجدار السوي الذي يتعرض لإشعاع

ليزر غير بنفسجي يصدر فلورة تتوزع بشكل متجانس نسبياً ضمن المجال ($396\ nm < \lambda < 500\ nm$)، في حين أن لويح التصلب العصيدي يصدر بشدة بجوار الطول الموجي ($\lambda = 390\ nm$) ثم يتناقص إصداره مع تزايد الأطوال الموجية.

إن تغير الفلورة بدلالة الزمن يحمل كذلك معلومات قيمة. ففي نهاية نبضة الإثارة الليزرية، يتناقص إصدار الفلورة لدى عودة الجزيئات إلى حالتها الأساسية. ويحدث التناقص في حالة المناطق المريضة أبطأ بكثير منه في المناطق السليمة. وبتقسيم شدة الفلورة المتأخرة على شدة الفلورة الفورية، نحصل على إشارة اتساعها في حالة لويح التصلب أكبر منه في حالة النسج السليمة... إن مثل هذه الاختبارات تسمح بتحديد طبيعة النسيج الذي يواجه الليف الضوئي وبتقرير إرسال نبضة ليزرية جديدة للمعالجة أم لا.

ثمة أمر آخر هو من الأمور الاحتياطية في معالجة لويحات التصلب العصيدي، يعتمد على تسجيل طيف إصدار الطبقة الرقيقة المتأينة بشدة أو البلازما المتولدة بالقطع الليزري. فالضوء الصادر عن الصفيحة المتكلسة يحوي خطوطاً طيفية مميزة للكالسيوم المتأين، تختفي بإتلافها بالليزر. عند هذه النقطة يجب إيقاف التعرض لإشعاع الليزر.

11.4.1. التسمم الخلوي بالإشعاع فوق البنفسجي

أثير جدل حول احتمال أن يؤدي تطبيق الإشعاع فوق البنفسجي لأغراض استئصال ضوئي إلى طفرات – ومِنْ ثَمَّ سمية – في الخلايا Cytotoxicity of UV Radiation. وقد أخذ هذا القول محمل الجد، لأن الجراحة الليزرية طبعاً يجب ألّا تحرض أمراضاً جديدة عندما تتخلص من أخرى. إنها حقيقة أن الدنا DNA يمتص الإشعاع فوق البنفسجي بشدة وخاصة عند 240-260nm. ومن المعروف جيداً أيضاً أن هذا الإشعاع يمكن أن يؤدي إلى تبدلات طفرية في البنية الكيميائية لجزيء الدنا DNA. إن أهم تحول كيميائي هو تشكل ثنائي كيميائي من أساسين من الـ pyrimidine. يتم اصطناع منتجات أخرى في الدنا التي يمكن أن يكون لها تعاقبات بيولوجية. غالباً ما تكون الخلايا قادرة على إصلاح الثنائيات قبل حدوث أي استجابة عدوانية. وهي آلية ضرورية للوقاية، لأن الدنا يحوي معلومات وراثية مهمة. ومِنْ ثَمَّ إذا كانت هذه المنتجات الثانوية لم تصلَح، يمكن أن تنتقل إلى الذرية معلومات خاطئة في أثناء انقسام الخلايا. يؤدي هذا الحدث في نهاية الأمر إلى تكوين طفرة. غير إن نتائج الدراسات تدل على أن إشعاع ليزرات الإكسايمر أقل تعريضاً للطفرات من الضوء فوق البنفسجي القادم من مصابيح الزئبق.

11.4.2. موجز الاستئصال الضوئي

يتم عن طريق التحطم المباشر للروابط الجزيئية بالفوتونات فوق البنفسجية العالية الطاقة، وهو استئصال نظيف جداً يترافق بمعلومات مسموعة وفلورة مرئية.

الليزرات النموذجية: ليزرات الإكسايمر مثل ArF و KrF و XeCl و XeF .

المدد النموذجية للنبضات: من 10 إلى 100 ns.

الكثافات النموذجية للاستطاعة: من 10^7 إلى 10^{10} W/cm^2.

تطبيقات خاصة: جراحة القرنية الانكسارية refractive corneal surgery.

11.5. الاستئصال المتحرض بالبلازما

لدى الحصول على كثافة استطاعة تتجاوز $10^{11} W/cm^2$ في الأجسام الصلبة والموائع أو $10^{14} W/cm^2$ في الهواء، تحدث ظاهرة يطلق عليها اسم الانهيار الضوئي optical breakdown، مشابهة لانهيار عازلية المادة عند تجاوز الحقل الكهربائي المطبق عليها قيمة معينة .

يدعى الاستئصال المتحرض بالبلازما في بعض الأحيان أيضاً الاستئصال بوساطة البلازما Plasma-mediated Ablation. يعبر المصطلحان كلاهما عن تفسير مقبول لما يجري. عموماً إن هذا النوع من الاستئصال يسببه بالدرجة الرئيسية تأين البلازما Plasma Ionization نفسها. هذا على عكس عملية أكثر ميكانيكية تدعى التمزق الضوئي Photodisruption. إن أهم بارامتر في الاستئصال المتحرض بالبلازما شدة الحقل الكهربائي الموضعي E التي تحدد متى يتحقق الانهيار الضوئي. وذلك إذا تجاوز E قيمة معينة هي العتبة، أي إذا كان الحقل الكهربائي المطبق يرغم تأيين الجزيئات والذرات سيحدث الانهيار. ترتبط شدة الحقل الكهربائي نفسها بكثافة الاستطاعة الموضعية I بالمعادلة الإلكتروديناميكية الأساسية

$$I(r,z,t)=\frac{1}{2}\varepsilon_0 cE^2 \qquad (11.1)$$

حيث ε_0 ثابت الكهرنفوذية، c سرعة الضوء. تبلغ شدات العتبة النموذجية للانهيار الضوئي في حالة نبضات البيكوثانية $10^{11} W/cm^2$. ومن ثم يصل الحقل الكهربائي المقابل إلى نحو $10^7 V/cm$. يمكن مقارنة هذه القيمة بحقول كولون الكهربائية الذرية أو داخل الجزيئية، ومِنْ ثَمَّ توفر الشرط اللازم لتأيين البلازما. يتولد خلال بضع مئات البيكوثانيات كثافة عالية جداً من الإلكترونات الحرة ضمن القيم النموذجية $10^{18} /cm^3$ في الحجم البؤري لحزمة الليزر. يعود توليد البلازما عموماً لحقل كهربائي شديد جداً يدعى الانهيار الكهرنفوذي dielectric breakdown. يؤكد مصطلح الانهيار الضوئي optical breakdown ولاسيّما أن البلازما تمتص بشدة الضوء فوق البنفسجي والمرئي وتحت الأحمر.

يمكن أن يكون إطلاق البلازما مضاعفاً two-fold كما وصفه كل من Puliafito and Steinert (1984) بالتفصيل. فقد لوحظ أنه يمكن إمّا للنبضات Q-switched في مجال النانوثانية وإمّا نبضات

الليزر المقفل الأنماط في مجال البيكوثانية أو الفمتوثانية أن تحرض بلازمات مكروية متوضعة. يفترض أن تكون عملية البدء في توليد الإلكترونات الحرة في النبضات Q-switched إصداراً كهرحرارياً thermionic emission، أي إن تحرر الإلكترونات يعود للتأيين الحراري. كما يمكن أن يحدث التأيين المتعدد الفوتونات، بنبضات الأنماط المقفلة، بفعل الحقل الكهربائي المرتفع المتحرض بفعل النبضة الليزرية الشديدة. يرمز مصطلح التأيين المتعدد الفوتونات عموماً للعمليات التي يوفر فيها الامتصاص المترابط لعدة فوتونات الطاقة اللازمة للتأيين. لا يمكن بلوغ التأيين المتعدد الفوتونات بشرط الترابط إلاّ في أثناء الشدات العالية للذروة كما في النبضات الليزرية البيكوثانية أو الفمتوثانية. غير أنَّ طاقات البلازما ودرجات حرارتها تكون أعلى في النبضات الليزرية الـ Q-switched بسبب ارتفاع طاقة عتبة تشكيل البلازما المرافق. وهكذا غالباً ما يترافق الانهيار الضوئي الذي يتحقق بنبضات نانوثانية بآثار جانبية نناقشها لاحقاً.

تعد شدة الحقل الكهربائي E كما سبق أن أكدنا البرامتر المهم في الاستئصال المتحرض بالبلازما. يجدر بالذكر أن قيمة معامل امتصاص البلازما تزداد مرتبتين إلى ثلاث مراتب، إذا كانت كثافة الطاقة الواردة ضعف عتبة توليد البلازما. ومِنْ ثَمَّ تؤدي البلازما المتحرضة دور حاجب للفوتونات الليزرية التالية. تدعى هذه الظاهرة مفعول الحجب البلازمي plasma shielding effect. حتى إن أهميته تزداد عند الطاقات الأعلى للنبضات. ينجم تزايد امتصاص البلازما بالدرجة الأولى عن ارتفاع كثافة الإلكترونات الحرة القادرة على امتصاص الفوتونات الليزرية. ومِنْ ثَمَّ يحدث نوع من الاستئصال شديد الفعالية عن طريق توليد البلازما.

موجز عن الاستئصال المتحرض بالبلازما

الفكرة الرئيسية: الاستئصال بتشكيل البلازما المؤينة.

المشاهدات: استئصال نظيف جداً، يترافق بتقرير مسموع وبشرارة بلازمية زرقاء.

الليزرات النموذجية: Nd:YAG و Nd:YLF و Ti:Sapphire .

المدد النموذجية للنبضات: من 100 fs إلى 500 ps.

الكثافات النموذجية للاستطاعة: من 10^{11} إلى 10^{13} W/cm^2.

تطبيقات خاصة: جراحة القرنية الانكسارية، معالجة النخور.

11.6. التمزق الضوئي

يترافق كل من تشكل البلازما plasma formation وتوليد الأمواج الصادمة shock wave generation بانهيار ضوئي optical breakdown. فإذا حدث الانهيار داخل نسج رخوة أو موائع، يمكن أن يحدث

بالإضافة إلى ذلك تكهُّف cavitation وتشكل نافورة حية jet formation. تصبح الأمواج الصادمة والآثار الجانبية الميكانيكية الأخرى عند طاقات أعلى للنبضة- ومِنْ ثَمَّ طاقات بلازمية أعلى مما هو عليه الحال في الاستئصال بالبلازما- أكثر أهمية وربما حتى تحدد المفعول الكلي على النسيج. يعود هذا بالدرجة الأولى إلى حقيقة أن الآثار الميكانيكية تتناسب scale خطياً مع الطاقة الممتصة. يكون مصطلح disruption في هذه الحالة (المشتق من اللاتينية ruptus = ruptured) أكثر ملاءمةً بسبب الصدمة الميكانيكية.

أما التكهُّف فهو مفعول يحدث لدى تبئير حزمة الليزر داخل نسيج معين وليس على سطحه؛ فتتكون فقاعات (التكهف) من أبخرة غازية – من بخار الماء وأكسيد الكربون بشكل رئيسي- تتبعثر في الوسط المحيط في نهاية الأمر.

من أهم تطبيقات التفاعل التمزقي خزع المحفظة الخلفية لعدسة العين posterior capsulotomy of the lens – غالباً ما يكون ضرورياً بعد جراحة الساد – وتفتيت الحصى البولية المتحرض بالليزر laser-induced lithotripsy of urinary calculi.

يتشقق النسيج split في أثناء التمزق الضوئي photodisruption بقوى ميكانيكية. ففي حين ينحصر الاستئصال المتحرض بالبلازما مكانياً في منطقة الانهيار، تنتشر مفعولات الأمواج الصادمة والتكهُّف في النسيج المجاور، ومِنْ ثَمَّ تحد من تموضع منطقة التفاعل. يكون الامتداد المكاني للمفعولات الميكانيكية في حالة مدد للنبضات تقع في مجال النانوثانية من مرتبة ملمترات حتى عند عتبة الانهيار نفسها. لا يلاحظ عملياً الاستئصال المتحرض بالبلازما فقط في حالة نبضات النانوثانية، لأن تدرج الضغط يتناسب مع طاقة البلازما. ومن ثم يترافق الانهيار الضوئي دائماً في حالة نبضات النانوثانية بتشكل أمواج صادمة حتى عند العتبة نفسها. ولما كان النسيج المجاور يمكن أن يتمزق بالقوى التداخلية، فإن وجود مثل هذه المفعولات غالباً ما تكون غير مرغوبة ولكنها عَرَضٌ مرافق. تسمح نبضات البيكوثانية أو الفمتوثانية بالمقابل بتوليد شدات عالية الذروة، بطاقات نبضات أخفض بكثير. ما تزال إمكانية تحقيق الانهيار الضوئي بهذه المدد القصيرة جداً للنبضات، ممكنة بينما تنخفض طاقة البلازما بشكل كبير ومِنْ ثَمَّ المفعولات التداخلية. أضف إلى ذلك أنه يزداد الاحتباس المكاني بقوة لتفاعل الليزر مع النسيج.

لما كانت آليتا التفاعل – الاستئصال المتحرض بالبلازما والتمزق الضوئي كلتاهما – تعتمدان على توليد البلازما، ليس من السهل دائماً التمييز بينهما. كانت جميع آثار النسج المتحرضة بالنبضات الليزرية الفائقة القصر تعزى في السبعينيات والثمانينيات في الواقع للتمزق الضوئي.

من الواضح أن الاستئصال المتحرض بالبلازما يقتصر بالأحرى على مجال قصير لمدد النبضات يصل إلى نحو 500 ps. وعند مدد أطول للنبضات، تحرّض كثافة الطاقة اللازمة لبلوغ الانهيار حالياً مفعولات جانبية ميكانيكية كبيرة.

يمكن النظر للتمزق الضوئي عموماً على أنه مفعول ميكانيكي متعدد الأسباب يبدأ بالانهيار الضوئي breakdown. إن الآليتين الرئيسيتين هما توليد موجة صادمة والتكهُّف وتستكملان بتشكل النافورة في حال انهيار التكهُّفات في الموائع بالقرب من حدود صلبة.

إن المفعولات الأربعة: تشكل البلازما وتوليد موجة الصدم والتكهُّف وتشكل النافورة تحدث كلها في مقاسات زمنية مختلفة. يبدأ تشكل البلازما في أثناء نبضة الليزر وتستمر بعد ذلك بضع نانوثانيات. وهو الزمن اللازم عملياً للإلكترونات الحرة لكي تنتشر في الوسط المحيط. يترافق توليد موجة صادمة بتمدد البلازما ومِنْ ثَمَّ تبدأ في أثناء تشكل البلازما. غير أنه يمكن للموجة الصادمة أن تنتشر في النسيج المجاور وتغادر المنطقة البؤرية، وقد تباطأت بعد نحو 50–30 ns إلى موجة صوتية عادية. والتكهُّف في نهاية المطاف هو مفعول جهري يبدأ بعد النبضة الليزرية بنحو 50–150ns. ينجم التأخير الزمني بسبب مدة عملية تبخر المادة. تؤدي فقاعة التكهُّف عادة إلى حدوث عدة اهتزازات من التمدد والانهيارات في دور قدره بضع مئات المكروثانيات. وحيث إن الضغط يزداد ثانية داخل الفقاعة أثناء الانهيار، يترافق كل ارتداد لفقاعة التكهُّف بموجة صادمة أخرى. أضف إلى ذلك أنه يمكن لكل انهيار أن يحرض تشكل نافورة إذا تولدت الفقاعة في جوار حافة صلبة. سنناقش كلاً من المفعولات التي تسهم في التمزق الضوئي بالتفصيل في الفقرات التالية لأن لها كلها أهميتها الفيزيائية.

11.6.1. تشكل البلازما

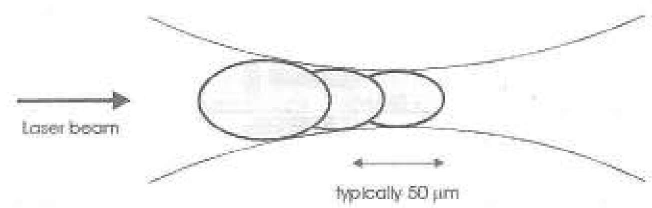
يجب تأكيد أنَّ مقدار الطاقة الممتصة في أثناء التمزق الضوئي يكون في الحالة النموذجية أعلى منه في حالة الاستئصال المتحرض بالبلازما بمرتبتين أو أكثر. ويعد هذا الأمر نتيجة مباشرة لمختلف كثافات الطاقة التي ترافق أياً من العمليات كما أكدنا في الشكل11.2. ومِنْ ثَمَّ تكون كثافة الإلكترونات الحرة ودرجة حرارة البلازما كلتيهما أيضاً أعلى مما هي عليه في حالة الاستئصال المتحرض بالبلازما وحدها purely plasma-induced ablation. ولذلك تكون المفعولات الثلاثة التالية هي الأكثر أهمية في التفاعلات المتداخلة لتأثر ضوءالليزر مع النسيج:

- الحجب بالبلازما plasma shielding.
- انتثار بريلوان Brillouin scattering.
- توليد البلازما المتعدد multiple plasma generation.

تمتص البلازما، فور تشكلها، الضوء الوارد وتنثر المزيد منه. من شأن هذه الخاصة أن تحجب البنى التحتية التي تقع أيضاً في مسار الحزمة. ولهذا المفعول أهمية كبيرة في تطبيقات الليزر الطبية. ففي العينية تتم حماية الشبكية بشكل كبير بهذا الحجاب البلازمي في أثناء الجراحة الليزرية للعدسة وللجسم البلوري. غير أنه في حالة الاستئصال المتحرض بالبلازما، ما يزال ينفذ جزء كبير من طاقة الليزر من خلال البلازما. وفي أثناء تفاعلات التمزق الضوئي، وعند بلازمات أكثر كثافة، يتعزز معامل الامتصاص، وتؤدي البلازما دور حاجب شديد الفاعلية.

في منطقة انتثار بريلوان Brillouin scattering، ينتثر الضوء الوارد بالأمواج الصوتية المثارة حرارياً وينزاح تواتره الموافق للتواترات الممكنة لفونونات المادة potential phonon frequencies of the material. في أثناء عملية تسخين البلازما تتولد الأمواج الصوتية مما يؤدي إلى انتثار بريلوان. حتى لدى تطبيق كثافات إشعاعية أعلى يمكن لضوء الليزر نفسه أن يحدث تغيرات alterations في الكثافة الضوئية ينتثر من خلالها. ومِنْ ثَمَّ يدعى هذا المفعول انتثار بريلوان المحثوث stimulated Brillouin scattering.

أخيراً يمكن في حالة الشدات العالية جداً للحقل الكهربائي التي يتم بلوغها في أثناء التمزق الضوئي، أن تتولد بلازما مضاعفة. ففي حالة الاقتراب من الاستئصال لا تحدث إلاّ شرارة واحدة عند البؤرة نفسها، بينما يمكن إضرام عدة بلازمات عند طاقات أعلى للنبضات. في الحالة الأخيرة، لن يحرض بلازما عند البقعة المحرقية إلاّ القسم الأول من نبضة الليزر. ويمكن للإشعاع التالي لدى زيادة تدفق النبضة، أن يولد أيضاً انهياراً ضوئياً قبل الوصول إلى أضيق خصر ممكن في الحزمة. وهكذا يبدأ شلال من البلازما يتجه من البقعة البؤرية باتجاه منبع الليزر، الشكل 11.3.



الشكل11.3. شلال من البلازما المتحرضة بليزر غاوسي الحزمة يرد من اليسار

يرتبط طول البلازما ارتباطاً وثيقاً بمدة النبضة. إذْ يزيد طول البلازمات المتولدة بنبضات طولها 30 ps بمرتين ونصف عما هو عليه في حالة البلازمات التي تتولد بنبضات مدتها 6ns ولها الطاقة نفسها. ولا تكون هذه الأخيرة أطول بقليل إلاّ عند عتبات الانهيار الموافقة لهما. تسبب هذه الاختلافات بأطوال البلازما ومِنْ ثَمَّ بأبعادها، انخفاضاً كبيراً بكثافة طاقة البلازما المتحرضة بنبضات البيكوثانية. وقد لوحظ عملياً اختلاف كبير في الشدات الموافقة لفلورة البلازما في المجال المرئي. أضف إلى ذلك أن أبعاد البلازما تحدد الجزء الكسري من الطاقة الواردة الذي يتحول إلى أمواج صادمة أو تكهُّفات. وإذا كانت

أبعاد البلازما أكبر، كما هو الحال في البلازما المتحرضة بنبضات البيكوثانية- يحتاج الأمر لمزيد من الطاقة لتأيين المادة وتبخيرها. ومِنْ ثَمَّ لم يعد مقدار الطاقة يسهم في توليد أمواج صادمة أو تكهُّفات ممكنة. ولهذا يمكن أن نستنتج أن احتمال أن تسبب البلازمات المتحرضة بنبضات البيكوثانية ضرراً ميكانيكياً في النسيج أقل مما هو عليه في حالة البلازمات من مرتبة النانوثانية.

11.6.2. توليد الأمواج الصادمة

يترافق الانهيار الضوئي المتحرض بالليزر، بارتفاع مفاجئ كظوم في درجة حرارة البلازما إلى قيم تصل إلى بضع عشرات آلاف الكلفن. يمكن رد هذا الارتفاع في درجة الحرارة بشكل رئيسي إلى الطاقة الحركية للإلكترونات الحرة. غير أنَّ إلكترونات البلازما لا تُحتبس في البقعة البؤرية لحزمة البلازما، بل تنتشر في الوسط المحيط نظراً لارتفاع طاقتها الحركية. عندما تتبع الإيونات العاطلة تأخيراً زمنياً معيناً، تنتقل الكتلة التي هي الأصل الأساسي لتوليد موجة الصادمة. وسرعان ما تنفصل هذه الموجة الصادمة عن حافة البلازما. وهي تنتقل في بادئ الأمر بسرعة تفوق سرعة الصوت hypersonic speed وتتباطأ في نهاية المطاف إلى سرعة الصوت.

وتكون الأمواج الصادمة الحاصلة بنبضات البيكوثانية أضعف بكثير من الأمواج الصادمة المتحرضة بنبضات النانوثانية بضغوط ذروية قابلة للمقارنة. وقد رصد انزياح في جزيئات الخلايا قدره 1.2μm في حالة نبضات طولها 30ps وانزياح قدره 4μm في حالة نبضات طولها نحو 6ns. يمكن لهذه الانزياحات الصغيرة بالأحرى أن تسبب تلفاً ميكانيكياً على مستوى أجزاء من الخلية فقط، وربما تحرض تغيرات وظيفية في الخلايا.

11.6.3. التكهُّف

بدأ الاهتمام بدينميكية فقاعات التكهُّف بالتزايد تاريخياً بعد تحقيق آثارها التحطيمية على السطوح الصلبة كدوافع المراكب، والتجهيزات الهدروليكية الأخرى. تحدث التكهُّفات المتحرضة بالليزر، لدى تولد البلازما داخل النسج الرخوة أو الموائع. تتبخر المنطقة البؤرية بارتفاع درجة حرارة البلازما. ومِنْ ثَمَّ يبذل العمل مقابل الضغط الخارجي للوسط المحيط، وتتحول الطاقة الحركية إلى طاقة كامنة تختزن في فقاعة التكهُّف المتمددة. في أقل من ميليثانية تنهار الفقاعة implodes ثانية نتيجة للضغط السكوني الخارجي حيث ينضغط محتوى الفقاعة بقوة- بخار الماء وأكاسيد الكربون في الحالة النموذجية-. ومِنْ ثَمَّ يرتفع كل من الضغط ودرجة الحرارة ثانية إلى قيم مماثلة لتلك التي تم بلوغها. ومِنْ ثَمَّ يصدر عبور ثان ويمكن لكامل التعاقب أن يتكرر عدة مرات، إلى أن يتبدد كامل الطاقة وتنحل جميع الغازات في الموائع المحيطة.

وقد تأكد أن ضرر النسيج بفعل الأمواج الصادمة يقتصر على مستوى جزء من الخلية نظراً لقصر أطوال الإزاحة التي تقع في المجال 1–4 µm. ولما كان قطر فقاعات التكهُّف يمكن أن يصل إلى بضعة ملمترات اعتُقِدَ أن تنشأ مفعولات التمزق الضوئي الجهري داخل النسج بشكل رئيسي من اجتماع فعل التكهُّف وتشكل النافورة التي سنناقشها.

11.6.4. تشكل النافورة

إن انطلاق نافورة سائل عالي السرعة تتطور أثناء انهيار فقاعة تكهُّف يمكن أن تؤدي إلى ضرر كبير في الأجسام الصلبة وتآكلها. وقد كان كل من Lauterborn (1974) و Lauterborn and Bolle (1975) أول من درس تشكل النافورة لدى توليد فقاعات تكهُّف أحادية بتبئير نبضات ليزرية Q-switched laser pulses في الموائع. عندما تنهار فقاعات التكهُّف في جوار حافة صلبة، تتولد نافورة من السائل العالي السرعة متجهة نحو الجدار. إذا كانت الفقاعة في تماس مباشر مع الحافة الصلبة في أثناء انهيارها، فإنه يمكن للفقاعة أن تحدث ضغطاً عالي التأثير ضد الجدار. ومِنْ ثَمَّ يكون للفقاعات المرتبطة بالأجسام الصلبة أكبر إمكانية ضرر.

والسؤال الآن، ما أصل تشكل النافورة؟ ولماذا لا تحدث إلاّ بالقرب من حافة صلبة؟ للإجابة عن هذين السؤالين ننظر عن كثب إلى انهيار فقاعة التكهُّف. عندما تنهار الفقاعة بفعل الضغط الخارجي يتسارع المائع المحيط نحو مركز الفقاعة. غير أنه عند الجانب الذي يشير إلى الحافة يتوافر مقدار أقل من المائع . ومن ثم يحدث الانهيار ببطء أشد عند هذا الجانب من الفقاعة. يقود هذا المفعول في نهاية الأمر إلى انهيار غير متناظر. تكتسب جزيئات المائع عند الجانب الأسرع في الانهيار، طاقة حركية إضافية لأن قوة التباطؤ، أي القوة التي يطبقها الجدار المقابل، هي الأبطأ بالانهيار. الأمر الذي يفسر سبب حدوث تشكل النافورة عند حافة الصلب. إذا كانت النافورة بطيئة نسبياً، فإن سرعة الجزء المركزي من الجانب الأبطأ المنهار ربما تكون أعلى حتى من النافورة نفسها. إن هذا يمكن إدراكه لأن ذلك الجانب من الفقاعة يتسارع حتى نهاية الانهيار نفسه. تتشكل في هذه الحالة نافورة مضادة تتجه في الاتجاه المعاكس.

يتم إلغاء مفعول الضرر لتشكل النافورة للغاية في حال ضرب فقاعة غازية متبقية من نبضة ليزرية متبقية بأمواج صوتية عابرة acoustic transients متولدة بنبضات متتالية. ويمكن لمجال الضرر المتحرض بنبضة مقدارها 4mJ أن يصل أقطاراً يمكن أن تبلغ 2–3.5mm إذا كانت الفقاعات الغازية مرتبطة بنسيج القرنية. غير أن الفقاعات الغازية الصغيرة جداً تنحل بسرعة بسبب صغر أبعادها وشدة توترها السطحي. ولذلك لن تسبب هذه الفقاعات المكروية أي مشكلة في التنبؤ عن مفعول معين إذا كان معدل تكرار نبضات الليزر قد اختير بعناية.

11.6.5. موجز التمزق الضوئي

الفكرة الرئيسية: تحطم النسيج وقطعه بقوى ميكانيكية، يترافق بظهور شرارة بلازما plasma sparking، وتوليد أمواج صادمة، وتكهُّف، وتشكل نافورة.

الليزرات النموذجية: ليزرات الحالة الصلبة مثل Nd:YAG و Nd:YLF و Ti:Sapphire.

المدد النموذجية للنبضات: من 100 fs إلى 100 ns .

الكثافات النموذجية للاستطاعة: من 10^{11} إلى 10^{16} W/cm^2 .

التطبيقات الخاصة: تفتيت العدسة lens fragmentation وتفتيت الحصى.

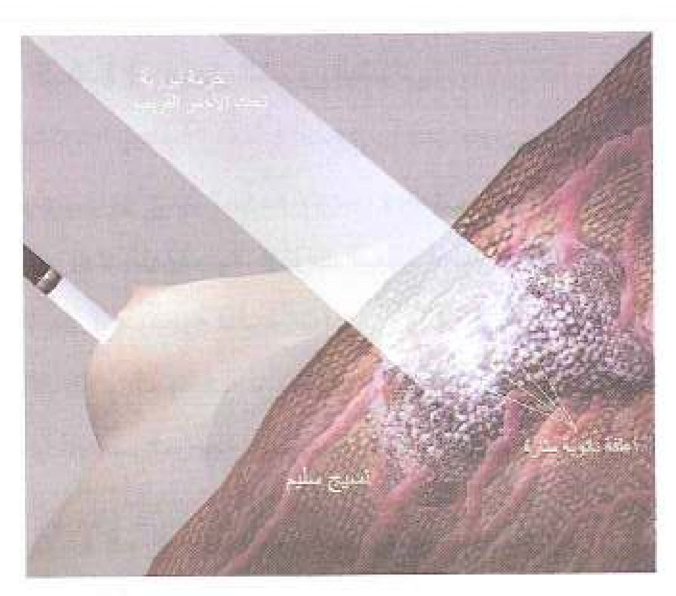
11.7. النقاط الكمومية ومعالجة الأورام

قام كل من Naomi Halas و Peter Nordlander من جامعة Rice في الولايات المتحدة بتصميم كريَّات مكروية مكونة من قوقعة رقيقة من الذهب (تقدَّر سماكتها النموذجية بنحو عشرة نانومترات) تغطي كريَّة من السيليس قطرها نحو مئة نانومتر. فوجدا أن تعريض قوقعة الذهب إلى أمواج كهرطيسية يؤدي إلى اهتزاز الإلكترونات فيها، مولدة أمواج كثافة إلكترونية، تدعى الأمواج البلازمونية. ونظراً للتآثرات بين الحقلين السائدين عند السطحين الداخلي والخارجي للقوقعة، فإن كلاً من أبعاد الجسيم وثخانة الطبقة الذهبية يحددان الطول الموجي الذي يمتص الجسيم المكون من الكرية وطبقة الذهب عنده الطاقة بالتجاوب. وبذلك أمكن للباحثين الحصول على كريات نانوية تمتص بشكل اصطفائي أطوالاً موجية متغيرة تمتد من بضع مئات النانومترات (الطرف الأزرق من الطيف المرئي) إلى تحت الأحمر القريب.

كريات مكروية مضادة للأورام. تجعل هذه الظاهرة من الكريات المكروية أداة واعدة لمعالجة السرطان (**الشكل**11.4)، ففي عام 2004 قامت N.Halas مع زميلتها Jennifer West بحقن كريات مكروية بلازمونية في الأوعية الدموية لفئران مصابة بأورام سرطانية، ووجدتا بأن الجسيمات لم تكن سامة، بل كانت تسعى للتمركز بالأحرى في النسج السرطانية وليس في النسج السليمة، لأن الأورام السريعة النمو تروى بشكل أفضل.

وبما أن النسج البشرية والحيوانية شفافة لبعض الإشعاعات تحت الحمراء. وجه الباحثون ضوء الليزر تحت الأحمر القريب، نحو الأورام لدى الفئران المحقونة عبر الجلد، فكان امتصاص الكريات المكروية المغشاة للطاقة عند التجاوب عالياً، أدى إلى رفع درجة حرارة النسج السرطانية من 37°C إلى 45°C.

إن هذا التسخين الضوئي الحراري كان يقتل الخلايا السرطانية دون أن يطال النسيج السليم الذي يحيط بها، وقد اختفت لدى الفئران المعالجة بالكريات المكروية كل علامات السرطان في أقل من عشرة أيام؛ في حين استمرت الأورام بالتزايد في المجموعات الشاهدة.



الشكل11.4. اقترح استخدام الآثار البلازمونية في إتلاف الأورام السرطانية، إذ يقوم الأطباء بحقن جسيمات مكروية في الدورة الدموية، والجسيمات عبارة عن كريّات من السيليس قطرها 100nm مغشّاة بالذهب (انظر الشكل المدخل). تمكث هذه الجسيمات المكروية في الورم. من شأن الضوء تحت الأحمر الموجه نحوها أن يعبر الجلد ويثير اهتزازات إلكترونية تجاوبية في الكريات المكروية التي تسخن، وبذلك تقتل الخلايا السرطانية من دون أن تضر بالنسج السليمة التي تحيط بها.



11.8. الألياف الضوئية في الكشف والمعالجة

كانت المعالجة الليزرية قبل عقدين من الزمان تجري، بنقل حزمة الليزر بمجموعة من المرايا، كان يطلق عليها اسم الذراع المتمفصلة. ونظراً لكبر أبعاد هذه الذراع وصعوبة استخدامها استبدلت بها الألياف الضوئية التي كانت أقطارها من الصغر بحيث تعمل كأدلة موجية waveguide تنقل الحزمة الليزرية إلى داخل الجسم في التطبيقات التشخيصية والعلاجية على حد سواء. وتشكل المنظومات الليفية المكونات الأساسية لمناظير الجوف endoscope المستخدمة على نطاق واسع في تصوير داخل الجسم.

يتكون الليف الضوئي من جزء داخلي يدعى القلب core ومن طبقة خارجية تدعى الغلاف cladding. يعتمد نقل حزمة الليزر في قلب الليف على مبدأ الانعكاس الكلي Total Internal Reflection (TIR) ولهذا يجب أن تكون مادة الغلاف أقل كسراً من مادة القلب (الشكل11.5).

إذا أرسلت حزمة ضوئية تبدأ من الزجاج نحو الهواء بزاوية تقدر بنحو °45 أو أكثر بالنسبة إلى الناظم على السطح الفاصل، ينعكس الضوء كلياً نحو الزجاج. تدعى هذه الظاهرة " الانعكاس الداخلي الكلي". إن الضوء يمكن أن ينتقل خلال الليف الضوئي بالانعكاسات الداخلية حتى لو كان الليف محنياً أو مثنياً. إن ظاهرة الانعكاس الداخلي الكلي للضوء عند سطح فاصل ليست إلاّ المبدأ الأساسي الذي تعتمد عليه الألياف الضوئية في نقل الضوء. وتعد الألياف الضوئية لبنة البناء في النظم الليزرية – الليفية.

كان قلب الليف يصنع في بادئ الأمر من الزجاج بينما كان يصنع الغلاف من البلاستيك. وقد كانت الجودة البصرية لهذه الألياف ضئيلة ولم تكن ملائمة للتطبيقات العملية. كان الضياع في هذه الألياف

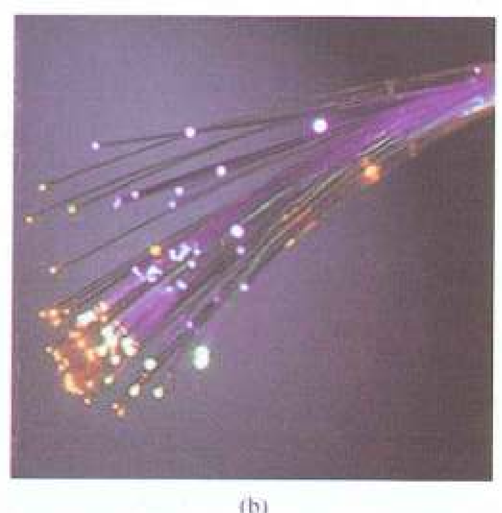
ليس بسبب الانعكاس الكلي بل بسبب الشوائب في الزجاج المستعمل، أي لم تكن عالية الشفافية. ثم ابتكرت أسلاك مسحوبة من الزجاج ومغلفة بزجاج من نوع آخر. ومع أن جودة الأخيرة ما تزال ضئيلة ولكنها كانت كافية لاستخدامها في مناظير الجوف التي لا تتطلب نقل الضوء إلى مسافات بعيدة. وقد تحسنت شفافية الزجاج للضوء كثيراً خلال سنوات قليلة لدى تنقيته بالاعتماد على التقنيات المتطورة لتنقية السلكون. وأصبحت شفافيتها عالية بحيث تسمح بأن ينفذ في ليف ضوئي طوله كيلومتراً أكثر من (95%) من الضوء الوارد إليه.

تشكل الألياف الضوئية لبنات البناء في نظم الاتصال حيث اختبر بعضها في تطبيقات عديدة. إذْ يمكن قرن ضوء الليزر نصف الناقل الصغري (الذي لا تزيد أبعاده على الملمتر) بإحدى نهايتي ليف ضوئي، حيث يمكن تعديل هذا الضوء بالإشارات الصوتية أو المرئية (الفيديو) أو الحاسبية. في حين يكشف الضوء النافذ من النهاية الأخرى لليف بكاشف نصف ناقل صغري آخر ثم تحول إشارة هذا الكاشف ثانية إلى إشارة صوتية أو تلفزيونية أو حاسبية. تمتاز الألياف الضوئية حالياً بقدرتها على نقل مقادير هائلة من المعلومات بضياع قليل، إذْ يمكن لعشرات البرامج التلفزيونية أو آلاف النداءات الهاتفية أن تساق في آن واحد خلال ليف واحد. وما من شك في أن الألياف الضوئية سوف تحل محل الألياف الحاسبية في نظم الاتصال المستقبلية كلّها.

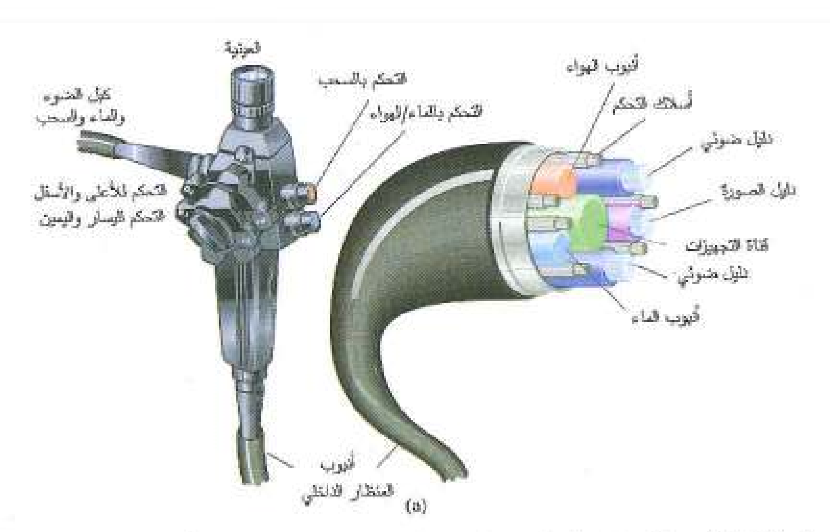
وقد كان لهذه الثورة في الاتصالات بالألياف الضوئية صداها المباشر في الطب. فنظم الأسلاك النحاسية الحالية غير ملائمة لنقل مقادير هائلة من المعلومات. إن الألياف الضوئية سوف تمهد الطريق للطب عن بعد. ومن تطبيقاتها الاتصالات، فالأطباء يفحصون المريض في مركز معين ويسجلون النتائج بنظام للفيديو، كما أنهم يقومون بفحوص معقدة نوعاً ما بالاعتماد على الأشعة السينية أو الأمواج فوق الصوتية أو تصوير التجاوب المغنطيسي MRI، ثم تنقل هذه الصور المرئية ونتائج التشخيص في الزمن الحقيقي إلى المركز الرئيسي لاستشارة الخبراء. ومن تطبيقاتها الأخرى حفظ المعلومات واستردادها. فالحواسب لا يمكنها أن تتحاور فيما بينها بفعالية عن طريق الأسلاك النحاسية. إذ يمكن للحواسب المستخدمة من قبل المشافي أن تتصل فيما بينها أو مع



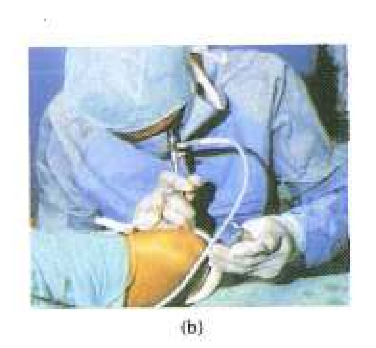
(a)


(b)

الشكل11.5. الانعكاس الداخلي الكلي في شريحة منحنية.



(a)


(b)

الحواسب الكبيرة في المواقع الرئيسية (كالملفات المركزية والمكتبات الكبيرة) عن طريق الألياف الضوئية، إذْ تتوافر المعلومات الطبية، كالتاريخ الطبي للمرضى أو تشخيص مرض ما حيث يمكن للأطباء القائمين على حواسيبهم المكتبية أن يستردوا هذه المعلومات الطبية أو العلمية من المكتبات المركزية. وإن المادة المكتوبة حالياً أو البيانات أو الصور العادية أو الصور بالأشعة السينية أو تسجيلات MRI أو معلومات التصوير المقطعي المحوسب لا يمكن الدخول إليها، كما يمكن أن تتلاشى. أمّا في المستقبل القريب فستحفظ هذه المعلومات على شكل رقمي (في أقراص صلبة مثلاً)، وستكون جاهزة للاسترداد الفوري عن طريق شبكة الألياف الضوئية.

ابتُكِرَت تطبيقات أخرى للألياف الضوئية منافسة تتناول مختلف طرائق التشخيص والمعالجة، إذْ يمكن للألياف الضوئية أن تنقل حزماً ليزرية عالية الاستطاعة للمعالجة الليزرية في داخل الجسم. فقد ابتكرت ألياف ضوئية خاصة لنقل الإشعاع فوق البنفسجي أو تحت الأحمر المتوسط أو تحت الأحمر البعيد. وقد كان لهذا الابتكار تأثير كبير في البصريات الليفية في الطب، فقد أمكن في بادئ الأمر استخدام ألياف أفضل للتنظير الجوفي مما أعطى صوراً عالية المقدرة الفاصلة بتمثيل ملون أقرب إلى المثالية، كما أن التقنيات الجديدة للألياف البصرية قد مهدت الطريق لاستخدام الألياف الضوئية في القثاطر الليزرية.

إن ابتكار الألياف الضوئية هو حصيلة عقود كثيرة من البحوث التي أجراها العديد من العلماء والمهندسين. ومن الجدير بالذكر أن الطبيعة منذ ملايين السنين كانت تعتمد على هذه الظاهرة. فقد اكتشف الحيويون أن بعض النسج في الشجيرات النباتية توجه الضوء على نحو ما تقوم به الألياف الضوئية مما يساعد النباتات على تنظيم فيزيولوجيتها. وفي عالم الحيوان ثمة ظواهر توجيه للضوء في نظم للتصوير كالعين لدى كثير من الحيوانات بما فيها عين الإنسان. أخيراً ثمة تقارير تفيد بتوافر ألياف ضوئية في الطبيعة تنقل الضوء فوق البنفسجي وأخرى تنقل تحت الأحمر.

الفصل الثاني عشر

بنية النواة والخصائص النووية

Nuclear Structure & Properties

يظهر من خلال استعراض منجزات الفيزياء وإمكاناتها المعاصرة أهمية نواتج التفكك الإشعاعي في الطب النووي. إذ تؤدّي النوى التي تتصف بالنشاط الإشعاعي دوراً مهماً في الدراسات الفيزيولوجية والكشف عن الإصابات بالأورام الخبيثة ومدى انتشار هذه الأورام، فضلاً عن إمكانية معالجة تلك الأورام بها. يجدر بالذكر أن أشعة غاما تؤدّي دوراً رئيسياً في هذه المهمة (وأحياناً أشعة بيتا)، في حين يمكن للإشعاع الناجم عن فناء البوزترونات أن يكشف عن وظائف الأعضاء وأهمها الدماغ. ولفهم آليات إصدار هذه الإشعاعات لا بد من دراسة أنواع القوى النووية والمفاهيم الجديدة التي أدخلت على كل من الفيزياء الذرية وفيزياء الجسيمات. كما أنه لا بد من دراسة الخصائص المغنطيسية للنواة ليتسنى لنا التعرف على مكونات الجسم البشري التي يمكن الاعتماد عليها في الحصول على صور تشريحية للجسم بتصوير التجاوب المغنطيسي النووي.

منذ أن اقترح رذرفورد نموذجه الذري الذي يتضمن وجود نواة للذرة، أجريت عدة تجارب عملية ودراسات نظرية للوصول إلى مفهوم جديد للنواة وبنيتها. وبناء على نتائج هذه الدراسات أمكن الوصول إلى تصور أكثر دقة لبنية النواة وسلوكها.

12.1. بنية النواة

تتكون النواة الذرّيّة من النكليونات وتضم البروتونات والنترونات. إن بعض هذه النوى مستقر والآخر غير مستقر تنشأ عنه ظاهرة النشاط الإشعاعي radioactivity.

وتتميز أي نواة **بعدد البروتونات** فيها الذي يساوي عدد الإلكترونات في الغمامة الإلكترونية لذرّتها (العدد الذرّي Z)، **وبعددها الكتلي** A أو بالعدد الكلي لنكليوناتها، **وبعدد النترونات** الممكنة $N = A - Z$.

يجدر بالذكر بأن العدد الكتلي هو عدد صحيح ويجب تمييزه من كتلة النواة التي لا تساويه بالضرورة. ففي حالة البروتون مثلاً $A = 1$ ولكن $M = 1.00759\,amu$، حيث amu ترمز إلى واحدة الكتل الذرية الحقيقية *Atomic mass unit* وتساوي 1/12 من كتلة ذرة الكربون – 12، ^{12}C (راجع الفصل 1) أي:

$$1\,amu = 1/N_{avo} = (1/6.02\cdot10^{23})\,g = 1.660240\cdot10^{-24}\,g = 931.5\,MeV$$

في العلاقة السابقة، استخدمنا علاقة آينشتاين للتكافؤ بين الكتلة والطاقة، لإيجاد المكافئ الطاقي لواحدة الكتل الذرّية.

إذا جعلنا $m(A,Z)$ ترمز لكتلة النواة و $M(A,Z)$ لكتلة الذرة وبإهمال طاقة ارتباط الإلكترونات يكون:

$$M(Z,A) = m(A,Z) + Zm_e \quad (12.1)$$

لدى الحديث عن نوى مختلفة، نطلق اسم النكليد Nuclide على نواة عدد بروتوناتها Z، وعدد نتروناتها N محدَّدَيْن، ويمثّل النكليد عادة بالشكل:

$$_{Z}^{A}X$$

مثل $^{235}_{92}U$: حيث $A = 235$ نكليوناً و $Z = 92$ بروتوناً و $N = 143$ نتروناً.

12.1.1. نصف قطر النواة

من الصعب الحصول على تصور دقيق لأبعاد النواة، وذلك لكون الجسيمات الداخلة في بنية النواة تخضع في حركتها لقوانين ميكانيك الكم الذي يُعدّ مبدأ الارتياب لـ هايزنبرغ أحد أساسياته، ونتيجة لذلك لا يبدو لسطح النواة شكل محدد وواضح، الأمر الذي يجعل تصور أبعادها أمراً صعباً. ومع ذلك حاول كثير من العلماء إيجاد تصور لهذه الأبعاد، وذلك بناء على بعض الافتراضات والنتائج التجريبية.

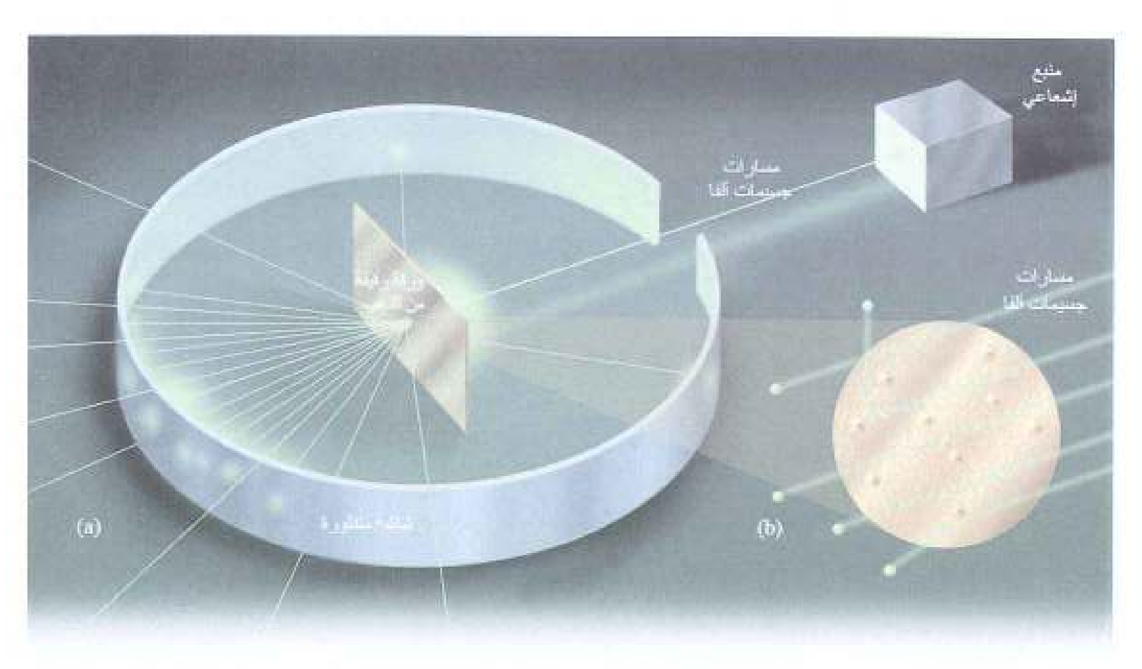
من أهم الطرائق المتبعة في إيجاد نصف قطر النواة، تجربة رذرفورد في تبعثر جسيمات ألفا (الشكل12.1) التي تتلخص في قذف هدف (شريحة رقيقة جداً من الذهب مثلاً) بجسيمات ألفا. وبزيادة طاقة جسيمات ألفا تدريجياً، وقياس عدد الجسيمات المتبعثرة عند زوايا ارتداد كبيرة (في حدود 180°) عند كل طاقة، يمكن حساب أقصر مسافة اقتراب D من النواة، التي يكون عندها جسيم ألفا قد اقترب من النواة إلى أقل مسافة ممكنة، ثم ارتد عنها بعد أن توقف فترة وجيزة جداً من الزمن. وعند هذه المسافة تتحول طاقة حركة جسيم ألفا إلى طاقة كامنة كولونية بحسب المعادلة:

$$\frac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \frac{2Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 D} \quad (12.2)$$

حيث Ze شحنة نواة الهدف و $2e$ شحنة جسيم ألفا. ومنها يمكن حساب المسافة D

$$D = \frac{4Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 m_\alpha v_\alpha^2} \quad (12.3)$$

ومن نتائج التجارب التي أجريت على عنصري الذهب والفضة وجد أن $D = 3.2\times10^{-14} m$ في نواة الذهب و $D = 3.0\times10^{-14} m$ في نواة الفضة، فإذا تصورنا أن المسافة D تعبر عن النهاية القصوى لنصف قطر النواة فإن هذا الأخير يجب أن يكون في الحالتين السابقتين أقل من القيمتين المذكورتين.



الشكل12.1. تجربة رذرفورد: تبعثر جسيمات ألفا على شريحة معدنية رقيقة.

وبعد إجراء تجارب أخرى على عناصر عديدة وجد أنه يمكن التعبير، بشكلٍ تقريبيّ، عن نصف قطر النواة R وهو البعد الأقصى الذي لا يمكن للقوى النووية أن تتخطّاه، بدلالة عددها الكتلي بالعلاقة:

$$R = r_0 A^{1/3} \qquad (12.4)$$

حيث r_0 ثابت مرتبته من مرتبة مدى تأثير القوى النووية، وتُحدَّد قيمته تجريبياً، ويمكننا أخذ القيمة $r_0 = 1.2\times10^{-15} m = 1.2\ fm$ لحساب أنصاف أقطار النوى وفق العلاقة (12.4). وبالاعتماد على العلاقة السابقة يمكن حساب حجم النواة:

$$V = \tfrac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi r_0^3 A = kA \quad \text{حيث} \quad k = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \qquad (12.5)$$

ويلاحظ من هذه العلاقة أن كتلة النواة (المتناسبة مع عددها الكتلي) تتناسب مع حجمها.

إن توزع الكتلة في قلب النواة يكون شديد التجانس خلافاً لما هو عليه الحال في محيطها. كما أن عدد النكليونات في وحدة الحجوم والذي يميز كثافة المادة النووية مستقل إلى حدٍّ بعيد عن طبيعتها ويساوي $A/V = 1/k = 3/4\pi r_0^3$. لما كانت الكتلة الوسطية للنكليون تساوي، $1.67\times10^{-24} gm$، فإن الكتلة الحجمية للنواة تقدّر بنحو مليوني طن لكل سنتمتر مكعب !.

12.2. طاقة ارتباط النواة

إن طاقة ارتباط مكوّنات نواة معينة تمثل الطاقة التي يجب تزويدها للنواة لتفكيكها إلى النكليونات التي تتكون منها.

باعتبار أن النواة جسم متماسك فإن النكليونات تكون مرتبطة داخلها، ويمكن أن تتحرك بفعل نوع من الطاقة الكامنة التجاذبية، وهي نتيجة محصلة جذب النكليونات الأخرى الموجودة داخل النواة. وحيث إن النكليونات جملة مقيدة فإن طاقتها الكلية تكون سالبة. وتكون طاقة ارتباط نكليون معين بالنواة هي الطاقة الدنيا التي يجب تقديمها لها لانتزاعه منها إلى خارجها حتى $r \to \infty$. وعلى العكس إذا أحضر نكليون من خارج النواة من مسافة $r \to \infty$ ليتحد مع النكليونات الأخرى في النواة الهدف، فلا بد لطاقته الكلية أن تنخفض بمقدار طاقة ارتباطه، إذ يصدر هذا الفارق عادة على شكل إشعاع غاما، أو يدخل في حساب نوع من أنواع التحول الإشعاعي. ويمكن التعبير عن هذا الفارق بتغير في كتلة النكليون.

نرى، مما سبق، أنه عندما يجتمع عدد من النكليونات لتشكيل نواة تنخفض طاقتها الكلية بمقدار ΔE يتناسب مع الانخفاض في مجموع كتل مكوناتها ΔM، تعطى طاقة الارتباط الكلية للنواة، وفق العلاقة:

$$E_B = \Delta E = \Delta M\, c^2 \qquad (12.8)$$

حيث c سرعة الضوء و E_B طاقة ارتباط النواة و ΔM مقدار نقصان الكتلة، ويعرف بأنه الفرق بين مجموع كتل عدد Z من البروتونات وعدد N من النترونات من جهة وكتلة النواة التي تحوي $A = N + Z$ من النكليونات.

$$\Delta M = ZM_p + NM_n - M_{nucleus}$$

مثال12.1. احسب طاقة الارتباط الكلية لنواة الهليوم، التي تبلغ كتلتها نحو $M_{He} = 4.001493\ amu$ (راجع الفصل1).

الحل

$$2M_p + 2M_n = 1.007276 \times 2 + 1.008665 \times 2$$
$$= 4.031882\ amu$$

وهكذا يكون النقص في الكتلة

$$\Delta M = 4.031882 - 4.001493 = 0.030389\ amu$$

ولحساب الطاقة المكافئة يمكن استخدام علاقة آينشتاين $E = mc^2$ أو باستخدام علاقة التحويل من وحدة الكتلة الذرية إلى طاقة بالإلكترون فولت. وبذلك تكون طاقة ارتباط نواة الهليوم

$$E_B = \Delta E = 0.030389\, amu \times 931.5\, MeV / amu = 28.306\, MeV$$

مثال12.2. تتكون نواة الديتريوم (أو الديترون) ^2_1H من بروتون p ونترون n

كتلة النواة $M = 2.013002\ amu$

كتلة $1p+1n$ تساوي $M'=2.016582\ amu$

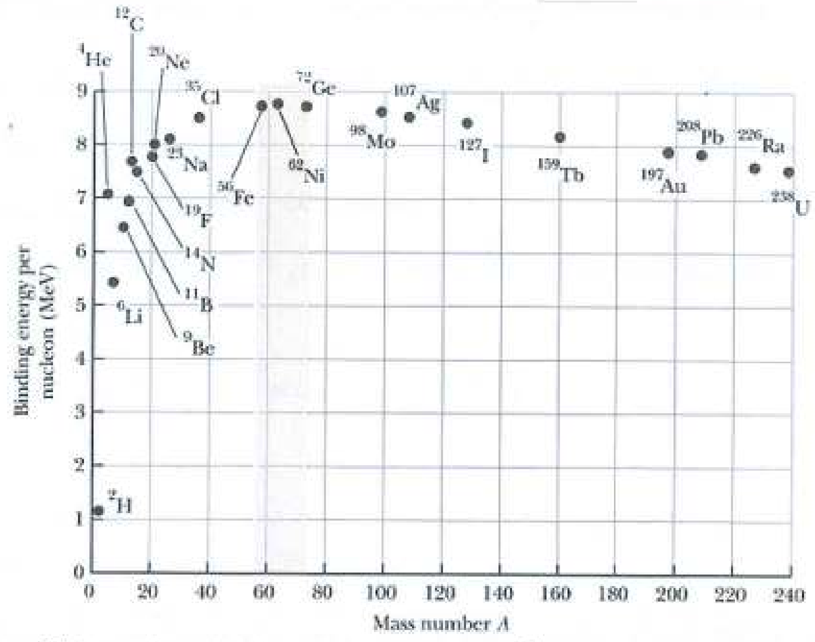
والفارق بينهما $\Delta M = 3.58\times10^{-3}\ amu$ هو مقدار نقصان كتلة النواة، والذي يترافق بالطاقة:

$$E_B = 931\times\Delta M = 3.33 MeV$$

حيث E_B تمثل الطاقة التي يجب تقديمها لتفكيك بروتون عن نترون وهي توافق طاقة ارتباط نواة الديتريوم. وهي طاقة موجبة وتنشأ من فعل القوى التي توحد النكليونات في النواة. وبشكل عام:

$$\Delta M = Zm_p + (A-Z)m_n - M(A,Z) \quad \text{حيث} \quad E_B = 931.5\Delta M \qquad (12.9)$$

من أهم الخصائص المميزة للنواة القيمة المتوسطة لارتباط النكليون، أي النسبة بين **طاقة ارتباط النواة** والعدد الكتلي، وهي القيمة التي تحدد استقرارية النواة. يبين الشكل12.3 العلاقة بين طاقة ارتباط النكليون E_B/A والعدد الكتلي A. يلاحظ من الشكل أن **طاقة ارتباط النكليون** تزداد بسرعة مع تزايد العدد الكتلي حتى تبلغ قيمة قصوى وقدرها $8.7\,MeV$ وذلك عند $A=60$ ، وتهبط بعدها ببطء إلى أن تصل إلى القيمة $7.5\,MeV$ عند $A=240$



الشكل12.3. طاقة ارتباط النكليون الواحد بدلالة العدد الكتلي. يدل الشريط الملون على منطقة أكبر قيمة لطاقة ارتباط النكليون الواحد، والنوى الواقعة إلى يمين الرصاص 208غير مستقرة

من النتائج المهمة لانخفاض طاقة ارتباط النكليون، ظاهرة الانشطار النووي المعروفة التي تنقسم فيها نواة ذات عدد كتلي كبير كاليورانيوم – 235 إلى نواتين أو أكثر لكل منها عدد كتلي متوسط، ويحدث ذلك لأن الحالة النهائية للنوى الناتجة تكون أكثر استقراراً من الحالة الأولى إذْ يزداد متوسط طاقة ارتباط النكليون من $7.5\,MeV$ إلى $8.5\,MeV$.

من النتائج الأخرى المتعلقة بانخفاض طاقة ارتباط النكليون ظاهرة الاندماج النووي حيث تتحد نواتان أو أكثر أعدادها الكتلية صغيرة لتكوين نواة أكبر، ويكون متوسط طاقة ارتباط النكليون فيها أعلى.

يمكن أن نستخلص من الخط البياني نتيجة مهمة ترتكز عليها نظرية القوى النووية، وهي أن طاقة ارتباط النواة الكلية تتناسب عموماً مع عدد نكليوناتها $E_B = E_b A$ حيث E_b ثابت تناسب يمثل طاقة ارتباط النكليون الواحد. وهذا يعني أن النكليون يتبادل التأثير مع عدد محدود من النكليونات وليس مع جميع النكليونات الأخرى في النواة. فلو تبادل النكليون التأثير مع بقية النكليونات تكون طاقة الارتباط الكلية متناسبة مع $A(A-1)$ وليس مع A فقط، وهذا ما نعبر عنه بأن القوى النووية تتصف بخاصة الإشباع.

الجدول 12.1. طاقة ارتباط النكليون

العنصر	$^{2}_{1}H$	$^{3}_{1}H$	$^{3}_{2}He$	$^{4}_{2}He$	$^{238}_{92}U$
طاقة ارتباط النكليون (MeV)	1.09	2.8	2.5	7	7.5

إن طاقة ارتباط النكليون الواحد ليس لها القيمة نفسها في النكليدات كلّها (الجدول 12.1) وتكون أكثر ارتفاعاً بقدر ما تكون النواة أكثر استقراراً.

ينقسم الخط البياني في الشكل 12.3 إلى ثلاث مناطق:

1. الأولى وتمتد إلى $A = 60$ حيث E_B / A تتزايد طاقة الارتباط بسرعة بانقطاعات عند كل من ^{4}He و ^{8}Be و ^{12}C و ^{16}O و ^{20}Ne.

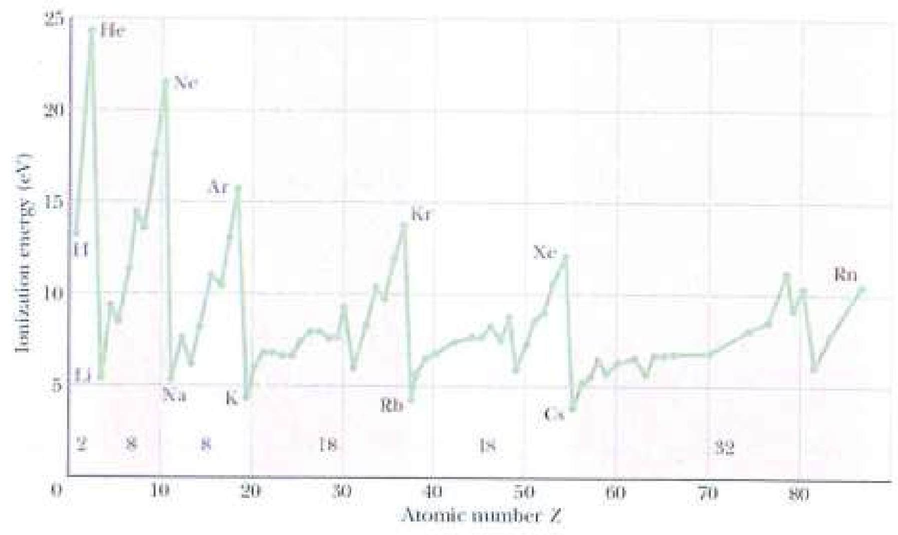
2. والثانية حيث يشكل المنحني عتبة عند $A = 60$ تقابل $E_B / A = 8.7 MeV / nucleon$ وهي حالة Fe و Co و Ni.

3. والثالثة حيث تنخفض E_B / A فيما بعد ببطء مع تزايد A إلى أن تصل في حالة $^{238}_{92}U$ إلى القيمة $7.5 MeV / nucleon$.

إن شذوذات القسم الأول تقابل نهايات عظمى شديدة الوضوح عند الأعداد الكتلية 4 و 8 و 12 و 16 و 20، ومِنْ ثَمّ من أجل النوى التي تكون أعدادها الكتلية من مضاعفات العدد 4 أو النوى التي تحوي عدداً زوجياً من النترونات يساوي عدد البروتونات، تكون طاقات ارتباطها عالية، فهي أكثر استقراراً.

تدل القياسات التجريبية والنماذج النظرية، التي تعتمد على مبادئ ميكانيك الكم، للنواة الذرية أن المجموعة المكونة من نترونين وبروتونين تشكل جملة مستقرة عملياً. لاحظ هنا التشابه بين دورية طاقة

ارتباط النكليون الواحد بدلالة العدد الكتلي في هذا الجزء من المنحني البياني ودورية طاقة تأين الذرة (اقتلاع الإلكترون) بدلالة العدد الذري في الشكل12.4.



الشكل12.4. طاقة تأين العناصر بدلالة العدد الذري.

يشير الجزء الثاني من الخط البياني في الشكل12.3 إلى أن العناصر المتوسطة الكتلة الذرية التي تحيط بالعنصر $A = 60$ هي العناصر الأكثر استقراراً. وتسمح عتبة الاستقرار في هذا الجزء بالتنبؤ عن أنواع التفاعلات النووية التي تؤدي، من حيث المبدأ، لتحرير الطاقة:

1. فالنواة الثقيلة $A > 150$ يمكن أن تتشطر إلى نواتين أخف ومِنْ ثَمَّ تعطي جملة أكثر استقراراً، وتدعى هذه الظاهرة "التفاعل الانشطاري *fission reaction*".

2. يمكن لنواتين خفيفتين العدد الكتلي لكل منهما $A < 20$ أن تندمجا معاً لتشكلا نواة أثقل من خلال التفاعل الاندماجي *fusion reaction*.

أخيراً يدل عدم تناظر الخط البياني إلى جانبي العتبة على أن الطاقة الاندماجية للنكليون الواحد أعلى من الطاقة الانشطارية للنكليون الواحد.

12.3. القوى النووية

تنبأ العالم الياباني يوكاوا في عام 1935 بوجود قوى التجاذب النووية، وقد سمحت النماذج النظرية التي طوّرها الفيزيائيون أمثال ماير وجينسن، للنواة الذرية، والمعطيات التجريبية التي تراكمت خلال النصف الثاني من القرن العشرين، بتحديد أهم خصائص القوى النووية. تمتاز القوى النووية من قوى التجاذب الكتلي والقوى الكهراكدية البعيدة المدى بما يلي:

(1) القوى النووية هي قوى تجاذبية، وذلك لكي تتغلب على قوى التنافر الكولوني بين البروتونات داخل النواة.

(2) هي قوى شديدة قصر المدى، بحيث يصل هذا الأخير إلى قيم من مرتبة $10^{-15}m$ من مركز النواة، وهي لا تتبع قانون التربيع العكسي للمسافات.

(3) القوى النووية بين بروتونين في مستوى كمومي معين تساوي القوى النووية بين نترونين في المستوى نفسه، بغض النظر عن قوى التنافر الكولونية، وهي أيضاً تساوي القوى بين بروتون ونترون في المستوى الكمومي نفسه.

(4) مع أن القوى النووية عموماً هي قوى تجاذبية إلاّ أنها تكون قوى تنافر لمسافات قصيرة جداً داخل النواة (أقل من 0.4 fm)، ممّا يمنع اقتراب النكليونات من بعضها إلى أقل من هذه المسافة، ومِنْ ثَمَّ انهيار النواة.

(5) نظراً لشدة قصر مدى القوى النووية فهي تؤثر بين النكليونات المتجاورة، وهذه أيضاً هي إحدى الصفات المميزة للقوى النووية والمعروفة بخاصة الإشباع، فإن مجموعة من أربعة نكليونات تؤلف عادة بنية أكثر استقراراً من أية نوى أخرى ذات أعداد كتلية مجاورة أخرى، وهذا يفسر عدم وجود نوى أعدادها الكتلية خمسة مثل ^5He و ^5Li.

(6) بالإضافة إلى خاصة الإشباع، توجد دلائل على ميل النكليونات إلى تكوين أزواج داخل النواة.

يمكننا القول: إنَّ النكليونات ضمن النواة الذرية تخضع لثلاثة أنواع من القوى أو التأثيرات المتبادلة.

1. تتدخل قوى التأثر الكهرطيسية التدافعية البعيدة المدى بين البروتونات في النواة، وهي مسؤولة عن عدم استقرارها.

2. أما قوى التأثر الشديد Strong Interaction القصيرة المدى (من 1.2 إلى 0.6 فرمي) فهي التي تكفل تماسك النواة.

3. وأما قوى التأثر الضعيف Weak Interaction القصيرة المدى $< 0.5 fm$ فهي تدافعية بين كل النكليونات وتسبب عدم انضغاطية Incompressibility النواة وهي المسؤولة عن النشاط الإشعاعي β.

أما النوع الرابع من قوى التأثر المعروفة في الطبيعة، وهو الثقالي فهو مهمل عند هذا المقياس.

إن صغر نصف قطر التأثر الشديد يجعل تأثر أي نكليون مع آخر يقتصر على النكليونات الواقعة في جواره المباشر. وإن هذا الإشباع يفسّر شكل الخط البياني في الشكل 12.3. ففي الجزء الأول لم تصل هذه القوى إلى الإشباع، ويمكن لطاقة ارتباط النكليون أن تزيد مع زيادة عدد النكليونات A. وهي تبلغ الإشباع

عند الذروة، إذْ تبلغ النسبة E_B / A قيمتها العظمى. في حين تنخفض هذه النسبة في الجزء الأخير نظراً لأنه لم يعد ممكناً تعويض قوى التآثر الكهرطيسي التدافعية بين البروتونات بالتفاعل الشديد المشبع، الأمر الذي يجعل النوى الثقيلة غير مستقرة.

وعندما يقترب، نكليونان أحدهما من الآخر بشدة بفعل قوى التآثر الشديد، فإن قوى التآثر الضعيف التي تسود عند الأبعاد الصغيرة جداً تمنع أي جسيم من الاندماج بالآخر، فيتشكل نوع من القلب القاسي يجعل النواة غير قابلة للانضغاط.

12.4. النظائر والأنواع النووية

تؤدّي النظائر دوراً رئيسياً في الطب النووي، ولهذا فهي ستحظى باهتمام خاص لدى دراستنا للأنواع النووية. إن النظائر *isotopes* بالتعريف هي نكليدات لها العدد الذري نفسه وتختلف بعددها الكتلي. وهذا يجعل استقرارها مختلفاً فيما بينها. أي إنها ذرات تحوي نواها العدد نفسه من البروتونات، ولكنها تختلف بعدد نتروناتها، ولها المصطلح الكيميائي نفسه المرتبط بعدد الإلكترونات، ولا يمكن التمييز فيما بينهما كيميائياً. ولفصلها يجب الاستعانة بالطرائق الفيزيائية كالمطيافية الكتلية.

يضم أي عنصر كيميائي عدداً من النظائر المختلفة، بعضها طبيعي، ويولد بعضها الآخر بطرائق صنعية، كالهدروجين مثلاً ^1_1H و ^2_1H و ^3_1H واليورانيوم $^{233}_{92}U$ و $^{235}_{92}U$ و $^{238}_{92}U$.

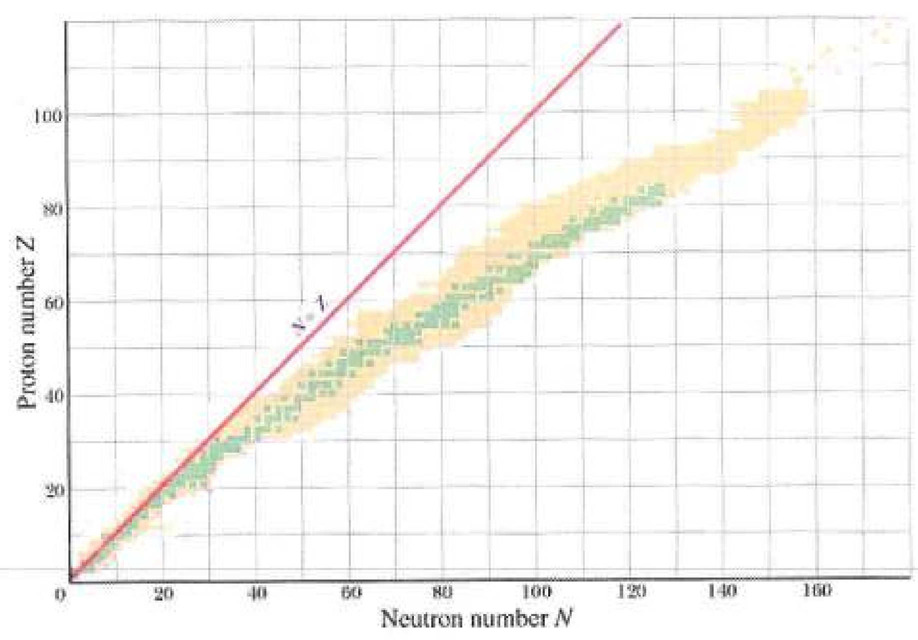
من الجدير بالذكر أن الوفرة النظيرية (نسب مختلف النظائر) في عنصر طبيعي ثابتة. يبين الشكل12.5 المخطط النتروني – البروتوني الذي يمثل عدد النترونات N في النظائر المستقرة بدلالة عدد البروتونات.

- فالعناصر الخفيفة حيث $N/Z \approx 1$ تتوزع على المنصف الأول.
- وعندما يزداد Z تتزايد هذه النسبة تدريجياً لتزايد عدد النترونات بسرعة أكبر منها في البروتونات، ويصبح شكل الخط البياني أقرب إلى شكل القطوع. ويستنتج من هذا المخطط التالي:

1. تتوزع النظائر *isotopes* على الخط الأفقي نفسه ثابت $= Z$ فهي تحوي العدد نفسه من البروتونات مثل ^1_1H و ^2_1H و ^3_1H حيث $Z = 1$.
2. تتوزع على الخط الشاقولي نفسه ثابت $= N$ ما يسمى الإيزوتونات *isotones* التي تحوي العدد نفسه من النترونات مثل $^{14}_6C$ و $^{15}_7N$ و $^{16}_8O$ حيث $N = 8$.

3. تتوزع على العمود على المنصف الأول ما يسمى الإيزوبارات *isobars*، ثابت $A =$ التي تحوي العدد نفسه من النكليونات مثل $^{14}_{6}C$ و $^{14}_{7}N$ حيث $A = 14 nucleons$.

4. أخيراً يمكن أن توجد نوى تحوي العدد نفسه من النترونات والبروتونات ولكنها تختلف فيما بينها بحالة الإثارة، وهي الإيزوميرات النووية *isomers* أو المماكبات.



الشكل12.5. مخطط النترونات – البروتونات.

12.5. النشاط الإشعاعي

تتحول النواة غير المستقرة فجأة، وفي أي لحظة إذا افترضنا نواة معزولة، إلى نواة أخرى أكثر استقراراً بوجه عام، وذلك بإصدار جسيم معين أو فوتون. يطلق على هذه الظاهرة اسم "**النشاط الإشعاعي**".

عندما ينجم عدم استقرار النواة عن **وجود فائض في عدد النترونات**، فإن أحدها يتحول إلى بروتون، ويرافقه إصدار النواة لإلكترون β^- يماثل إلكترونات الغمامة الإلكترونية التي تحيط بالنواة ولو أنه مزود بطاقة هائلة تقذف به بعيداً، خارج النواة، بالإضافة إلى جسيم صغير ينتمي إلى المادة المضادة ويطلق عليه اسم **النترينو المضاد** $\bar{\nu}$. ويدعى هذا التفكك "**إصدار بيتا** β".

مثال12.3. تحول الكربون – 14 الذي يترجم بزيادة العدد الذري وثبات العدد الكتلي:

$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + \beta^- + \bar{\nu}$$

وكذلك $^{99}Mo \rightarrow {}^{99m}Tc + \beta^- + \bar{\nu}$

وكذلك $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$

(يدل m في المعادلة الثانية على الحرف الأول من كلمة *metastable* التي تعني غير مستقر، أي إننا نحصل على مماكب التكنسيوم غير المستقر الذي يتفكك لاحقاً بإصدار فوتون غاما يمكن استخدامه في استكشاف الجسم البشري).

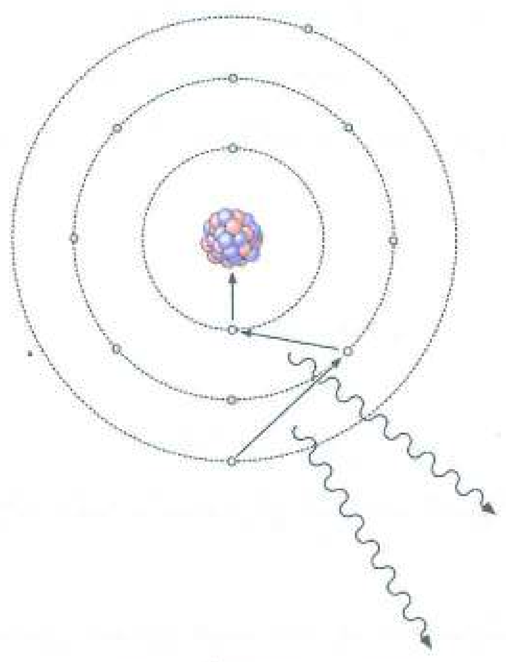
يجدر بالذكر أنه يمكن الاعتماد على أشعة بيتا في استكشاف الأعضاء السطحية من الجسم كالغدة الدرقية مثلاً التي لا يتطلب التعرف على انتشار الإصابة فيها أن يكون مدى اختراق الأشعة كبيراً. هذا ويشيع استخدام اليود المشع المصدر لأشعة بيتا في استكشافها.

أما في حال وجود فائض في عدد البروتونات:

– فإما (a) أن تأسر النواة إلكتروناً من الغمامة الإلكترونية وتكوّن نترونا جديداً بدءاً من هذا الإلكترون وأحد بروتوناتها، ويطلق على الظاهرة اسم **الأسر الإلكتروني** *electron capture*، ويعقب هذه الظاهرة إصدار **فوتونات الفلورة السينية** التي تنجم عن إعادة ترتيب الغمامة الإلكترونية، وتستخدم كعنصر إنارة في استكشاف الجسم البشري، إذا لم تكن طاقتها ضعيفة، (الشكل12.6).

مثال12.4. تحول السيزيوم إلى كزينون الذي يقترن بانخفاض العدد الذري وثبات العدد الكتلي، وإصدار الأشعة السينية النقية ذات الطاقة $30\,keV$.

$${}^{131}_{55}Cs + e^- \rightarrow {}^{131}_{54}Xe$$



الشكل12.6. ظاهرة الأسر الإلكتروني.

يمكن لظاهرة الأسر الإلكتروني أن تترك النواة في حالة شبه مستقرة فينتج عنها إصدار فوتون غاما، الذي يمكن أن يكون غير مرغوب فيه، ولو لم يرافقه إصدار أي جسيم.

الفلورة السينية

فلورة الأشعة السينية X-ray fluorescence (XRF) *إصدار للأشعة السينية المميزة الثانوية (أو الفلورة) من مادة تمت إثارتها بقصفها بأشعة سينية أو غاماوية عالية الطاقة، وهي تقابل انتقالات تالية بين المداريات الإلكترونية عندما يشغر مكان في العميقة منها. تستخدم الظاهرة على نطاق واسع في التحليل العنصري والتحليل الكيميائي، ولاسيّما في دراسة المعادن والزجاجيات، والمواد السراميكية ومواد البناء وفي بحوث الكيمياء الجوفية وعلم الطب الشرعي والآثار.*

– وإما(b) أن تصدر النواة إلكتروناً موجباً لدى تحول أحد بروتوناتها إلى نترون بالإضافة إلى نترينو. وهذا ما يدعى الإصدار البوزتروني β^{+}. يتفانى هذا البوزترون، الذي ينتمي إلى المادة المضادة، في نهاية المطاف مع أحد إلكترونات الوسط ليعطي فوتونين غاماويين ينطلقان في اتجاهين متعاكسين، ويمكن الاعتماد عليهما في إنارة الجسم البشري والحصول على صور وظيفية له من خلال التصوير المقطعي البوزتروني (الثنائي الفوتون).

مثال12.5. تحول الكربون – 11 إلى البور يؤدي إلى تخفيض العدد الذري مع ثبات العدد الكتلي:

$$^{11}_{6}C \rightarrow {}^{11}_{5}B + \beta^{+} + \nu$$

$$p + \text{طاقة} \rightarrow n + \beta^{+} + \nu$$

يُطلق على الأنواع الثلاثة السابقة من التحولات اسم التحولات الإيزوبارية لأنها تحافظ على العدد الكتلي.

– وعندما يكون العدد الكتلي كبيراً، فإن النواة تصدر جسيم ألفا الذي يمثل نواة الهليوم المكونة من بروتونين ونترونين.

مثال12.6. تحول الراديوم إلى رادون الذي يترافق مع انخفاض العدد الكتلي بمقدار 4 والعدد الذري بمقدار 2:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}Rn + \alpha$$

يجدر بالذكر أن مثل هذه الذرات الثقيلة لا يستخدم في استكشاف الجسم البشري بسبب الآثار التخريبية لأشعة ألفا.

– في بعض الحالات يتوافر نظيران يتساوى فيهما عدد البروتونات والنترونات، غير أن نوى أحد النظيرين تنطوي على فائض في طاقتها الداخلية، أي إنها مثارة، وغالباً ما تمثل حال النوى الناتجة عن التحولات المذكورة أعلاه. يمكن أن تعود النوى إلى الحالة الأساسية بعد التفكك مباشرة أو بعد أن تتأخر

عنه. وعندما يكون عمر الحالة المثارة طويلاً تدعى شبه مستقرة. نميز في هذه الحالة بين النواتين اللتين تحملان العدد الكتلي نفسه والعدد الذري نفسه، بإضافة الحرف m إلى رمز النظير ذي النواة المثارة كالتكنسيوم ^{99m}Tc، ويطلق على هذه النظائر، كما أسلفنا اسم " **المماكبات**".

أما فائض الطاقة فإما يصدر على شكل فوتون غاماوي γ:

$$^{99m}Tc \rightarrow {}^{99}Tc + \gamma$$

وهو العنصر الأساسي في **التصوير الومضاني والتصوير المقطعي الإصداري الغاماوي**، وإما أن ينتقل فائض الطاقة إلى السحابة الإلكترونية ليقذف بأحد إلكتروناتها خارج الذرة، ويطلق عليه اسم " **إلكترون التحول الداخلي**"، ثم تعيد الغمامة الإلكترونية ترتيبها لتصدر **فوتونات فلورة سينية**.

إن النظير المثالي عملياً في استكشاف الجسم البشري الحي هو الذي يصدر أشعة غاما النقية. ولسوء الحظ يأتي إصدار الإشعاع الغاماوي، في معظم النظائر، بعد إصدار جسيم ما مباشرة، ويتأخر في بعض الحالات الخاصة وتبقى النواة شبه مستقرة لفترة طويلة. وفي هذه الحالة يمكن فصل المماكب عن الأم (الذرة المولدة له) ليعطي نظيراً يصدر أشعة غاما النقية.

تعد المماكبات عموماً من أهم منابع الإصدار الكهرطيسي ولو أنه يتولد عنها إشعاع غير مرغوب فيه، وإن كلاً من الأشعة الغاماوية والسينية منخفضة الطاقة يمتص في الجسم فيسهم بذلك في الجرعة الممتصة. كما تعد إلكترونات أوجيه وإلكترونات التحول الداخلي منبعاً آخر للإشعاع الذي يسلك سلوك أشعة بيتا من حيث قصر مداها. يعطي التحول الداخلي لأشعة غاما مصدراً آخر للأشعة السينية التي يمكن أن تكون مفيدة وطاقتها قريبة جداً من طاقة أشعة غاما الأصلية بحيث يمكن عدهما أشعة واحدة. ومن الأمثلة على ذلك اليود – 125 واليود – 129 والزئبق – 197.

12.6. النماذج النووية

طوّر الفيزيائيون بين الثلاثينيات والثمانينيات من القرن الماضي، نماذج مختلفة لشرح خصائص النواة الذرّية الأساسية: الكتلة، ونصف القطر، وطاقة الارتباط والاستقرار، وسبين النواة وزوجيتها وعزمها المغنطيسي والكهربائي. اعتمدت النماذج الأولى على مفاهيم كلاسيكية واقتصرت في نتائجها على تفسير الكتلة النووية والاستقرار النووي بشكلٍ إجمالي، بينما بُنيت النماذج الأكثر دقّة في مقاربتها للمعطيات التجريبية على مبادئ ميكانيك الكم.

12.6.1. نموذج القطرة السائلة

كان بور *N. Bohr* هو من اقترح نموذج القطرة السائلة Liquid Drop Model، لشرح الانشطار النووي، إذْ تكون التفاعلات النكليونية شديدة وفقاً لهذا النموذج، وتؤخذ فيه الخصائص الإجمالية للنكليونات.

اعتمد بور في نموذجه على التشابه مع تماسك قطرة الماء، إذ قال إن كل جزيء في قطرة من الماء يتبادل تفاعلات فاندرفالس المتماثلة مع الجزيئات المجاورة له مباشرةً. ويُفسّر الشكل الكروي للقطرة بطاقتها السطحية الصغرى (التوتر السطحي) وكثافتها المستقلة عن أبعاد القطرة.

واستناداً إلى الحقائق التجريبية الثلاث الآتية:

1. تميّز النواة بكثافة نووية عالية جداً ومستقلة عن أبعادها وعدم قابليتها للانضغاط.
2. استقلال قوى التأثر النووي الشديدة المسؤولة عن تماسك النواة عن طبيعة النكليونات.
3. عدم وجود هذه القوى التي تتميّز بشدة قصر مدى فعلها إلاّ بين النكليونات المتجاورة فقط (الإشباعية).

اقترح بور تمثيل بنية النواة بنموذج القطرة السائلة الذي تؤدي فيه النكليونات دور جزيئات الماء، وقوى التفاعل الشديد تؤدي دور قوى فاندرفالس.

يسمح هذا النموذج بتفسير بعض الخصائص الأساسية للنواة ككتلتها، وطاقة ارتباطها، كما يفسّر بشكلٍ مبسّط التفاعلات الانشطارية لبعض النوى الثقيلة، وكذلك إصدار جسيمات ألفا. ومن المآخذ الأساسية على هذا النموذج أنّه يعالج النواة ككل، مهملاً الخصائص الفردية للنكليونات.

12.6.2. نموذج الطبقات

يكون كل نكليون في نموذج الطبقات Shell Model مستقلاً عن النكليونات الأخرى ومِنْ ثَمَّ أكثر تفرّداً. وهو يماثل النموذج الذي اقترحه بور فيما يخصّ الغمامة الإلكترونية للذرة. فهو يتنبأ بأنه يمكن للنواة أن تملك حالة أساسية وحالات مثارة.

ثمّة عدد من الحقائق التجريبية في صالح هذا التشابه.

1. إن النوى التي تملك عدداً من البروتونات أو النترونات مساوياً لأحد الأعداد 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 تمتلك قيماً عالية جداً لطاقة الارتباط للنكليون الواحد، ولم يتمكّن نموذج القطرة السائلة من تفسيرها، وهي تشبه بذلك ذرات الغازات النادرة التي تحوي عدداً من الإلكترونات مساوياً 2 أو 10 أو 18 أو 36 والتي تبدي عطالة كيميائية كبيرة (انظر الشكل 12.4). يبيّن الشكل 12.7 مقارنة بين طاقة الارتباط للنكليون الواحد كما يتنبأ بها نموذج القطرة السائلة، والقيم المقيسة تجريبياً، ونلاحظ ابتعاد هذه الأخيرة عن

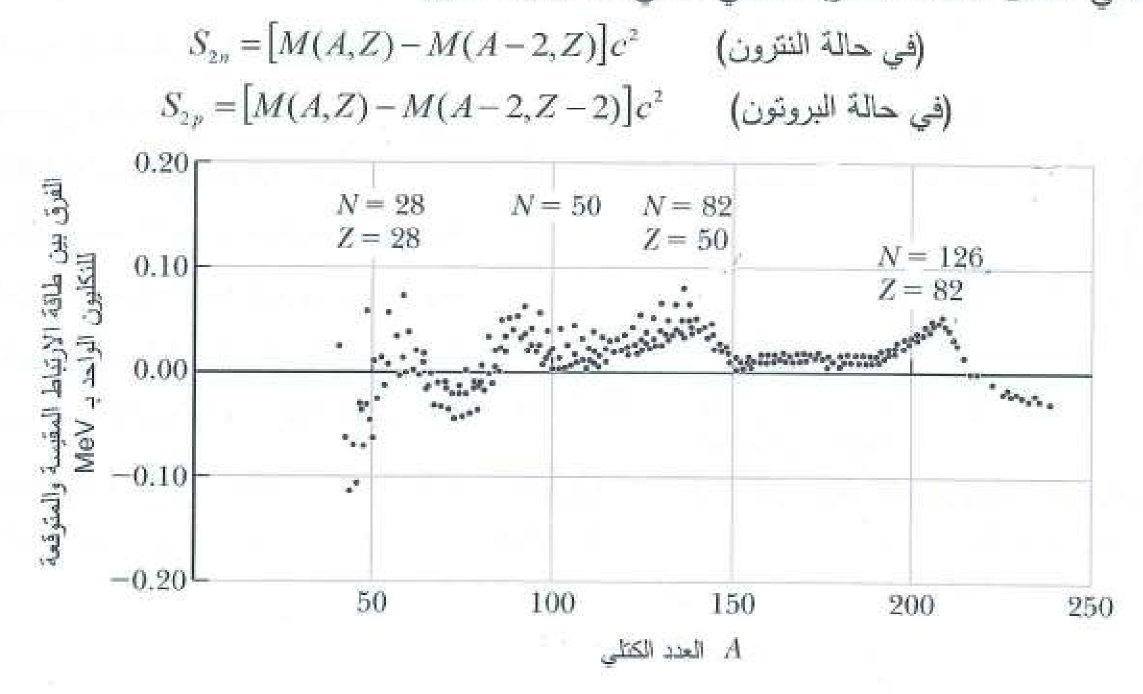
النموذج النظري عند القيم المذكورة أعلاه لعدد النترونات أو البروتونات والتي نطلق عليها اسم الأعداد السحرية.

2. إن العناصر التي تعقب الغازات النادرة في التصنيف الدوري وهي المعادن القلوية (مثل Li أو Na أو K ...) تملك إلكتروناً إضافياً شديد التفاعل، وإذا كان $^{4}_{2}He$ شديد الاستقرار (جسيم ألفا) فإن $^{5}_{3}Li$ (الناجم عن أسر بروتون) غير مستقر على الإطلاق.

3. أخيراً يوجد تشابه كبير بين الخط البياني الممثل لطاقة تأيين الذرة (الطاقة الضرورية لاقتلاع الإلكترون) بدلالة عدد الإلكترونات Z (الشكل12.4) والخط البياني الممثل لطاقة فصل نكليونين (نترونين أو بروتونين) من النواة (الشكل12.8) التي تكافئ طاقة التأين في الذرّة، إذْ إنَّ طبيعة التفاعل بين النكليونات تدفعها لتشكيل أزواج من نفس النوع pairing، وهنا أيضاً حيث توافق التغيّرات المفاجئة لطاقتي الفصل الأعداد السحرية. نعطي طاقتي الفصل بالعلاقتين:

$$S_{2n} = \left[M(A,Z) - M(A-2,Z)\right]c^2 \qquad \text{(في حالة النترون)}$$

$$S_{2p} = \left[M(A,Z) - M(A-2,Z-2)\right]c^2 \qquad \text{(في حالة البروتون)}$$



الشكل12.7. ابتعاد القيم التجريبية لطاقة الارتباط الوسطية للنكليون عن توقعات نموذج القطرة السائلة عند الأعداد السحرية. يوحي ظهور قمم منتظمة في البيانات التجريبية بسلوك لايتنبأ به موديل القطرة السائلة.

وقد افترضت ماير *M. Meyer* أن البروتونات والنترونات في داخل النواة تشغل مستويات طاقية تتميز بأربعة أعداد كمومية. توافق هذه المستويات نموذج الطبقات. وقد لوحظت استقرارية كبيرة في حالة الطبقة الممتلئة بأربعة نكليونات (نترونين وبروتونين). ففي حين أن الحالة الكمومية الإلكترونية المحيطية لا يمكن أن تُشغل إلا بإلكترونين متعاكسين في السبين، يمكن للحالة الكمومية النكليونية في

الواقع أن تشغل ببروتونين ونترونين لأن البروتون مشحون والنترون ليس له شحنة ومِنْ ثَمَّ بأربعة نكليونات.

تمتلك النواة كما هو الحال في الذرة مستوىً أساسياً ومستويات مثارة.

تترافق العودة إلى الحالة الأساسية أو الاسترخاء:

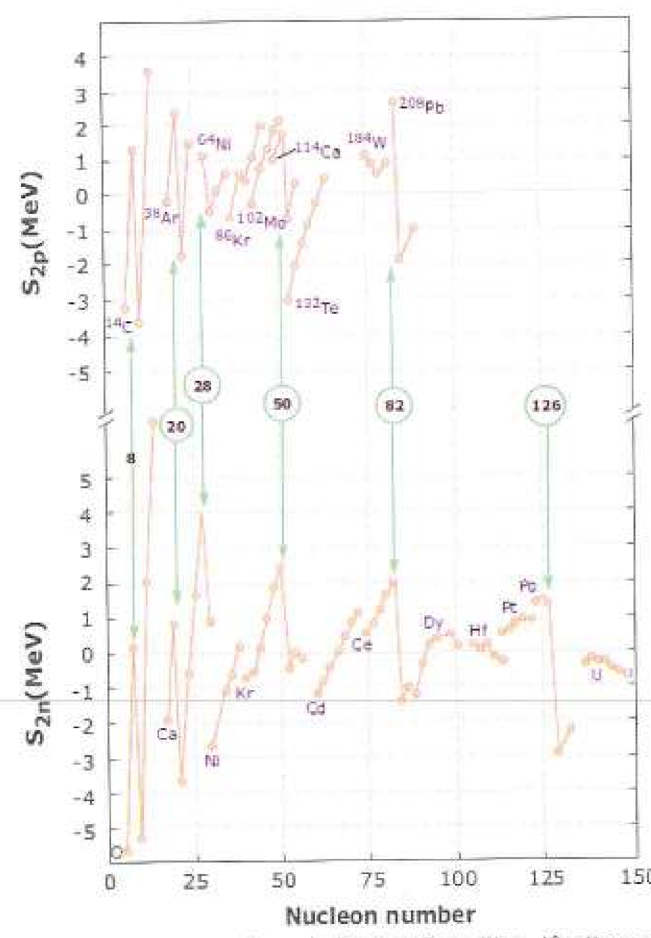
- إما بإصدار فوتون
- وإمّا بظاهرة التحوّل الداخلي.

إذا كان هذا النموذج يسمح بتفسير بعض الظواهر المرتبطة مباشرة ببنية النواة (خصائصها السكونية) فهو لا يسمح بتفسير خصائصها الديناميكية كالتفاعلات النووية مثلاً.

يطلق اسم الأعداد السحرية على عدد البروتونات أو عدد النترونات عندما يكون مساوياً أحدهما أو كلاهما لأحد الأعداد: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 .

توافق هذه الأعداد نوى الذرات الأكثر استقراراً في الطبيعة مثل:

$^{208}_{82}Pb_{126}$ و $^{40}_{20}Ca_{20}$ و $^{16}_{8}O_{8}$ و $^{4}_{2}He_{2}$



الشكل 12.8. الشكل الأعلى: طاقات فصل بروتونين، لمجموعات متتالية من الإيزوتونات (N ثابت)، وقد تمت الإشارة إلى قيمة Z الأخفض لكل مجموعة. الشكل الأسفل: طاقات فصل نترونين لمجموعات من الإيزوتوبات.

ومن الجدير بالذكر أن هذه النوى تتمتع بسبين نووي معدوم ومِنْ ثَمَّ بعزم مغنطيسي معدوم، ولا يمكن الاعتماد عليها في تصوير التجاوب المغنطيسي النووي؛ إذ يجب أن يكون للنواة عزم مغنطيسي غير معدوم حتى تتأثر بالحقل المغنطيسي المطبق.

12.6.3. النموذج الشامل

وهو يشكل تسوية بين النموذجين السابقين اللذين يعتمدان على حقيقة أنه عندما يختلف عدد النكليونات بكثير عن الأعداد السحرية (النوى الثقيلة) تبدو هذه النكليونات أقل فردية مما يفرضه نموذج الطبقات.

فالنواة تمثل مِنْ ثَمَّ وفي آن معاً قلباً ذا بنية داخلية أشبه بالقطرة السائلة. وعلى حدودها تتوزع النكليونات الأخرى على مستويات نكليونية مكمّاة وأكثرها عمقاً مشغولة بالحالة الأساسية.

12.7. الخصائص المغنطيسية للنواة

12.7.1. الاندفاع الزاوي المداري للنكليون L

ثمة تشابه كبير بين المعالجة الكمومية للنواة والمعالجة الكمومية لإلكترونات الذرة، وتتشابه تأثراتها مع الحقول الكهربائية والمغنطيسية كذلك مع الانتباه إلى تأثير اختلاف كتلة النكليون عن كتلة الإلكترون، ومِنْ ثَمَّ يمكن أن نعرف:

لكل نكليون _ بروتون أو نترون _ اندفاع زاوي مداري ناتج عن حركته المدارية داخل النواة. وبناءً على نظرية الكم يأخذ شعاع الاندفاع الزاوي المداري $\vec{L}$ للنكليون قيماً منفصلة ترتبط بثابت بلانك $\hbar$، وقيمته المطلقة:

$$|\vec{L}| = \sqrt{l(l+1)}\,\hbar \qquad (12.10)$$

حيث $l = 0,1,2,...$ العدد الكمومي المداري.

هذا ولا يمكن تعيين مساقط الاندفاع الزاوي المداري كلها في آن واحد، بل يمكن فقط تعيين القيمة المطلقة للاندفاع وقيم مساقطه على اتجاه محدد في الفراغ وليكن المحور oz، حيث تأخذ هذه المساقط القيم:

$$L_z = \hbar l, \hbar(l-1), ..., \hbar, 0, -\hbar, ..., -\hbar(l-1), -\hbar l \qquad (12.11)$$

ويكون عدد المساقط الممكنة على هذا المحور $(2l+1)$، والقيمة العظمى هي $(L_z)_{max} = \hbar l$.

12.7.2. سبين النكليون $\vec{S}$

يملك النكليون، بالإضافة إلى الاندفاع الزاوي المداري، عزم لف ذاتي، يمكن تمثيله بشعاع قيمته المطلقة:

$$|\vec{S}| = \hbar\sqrt{s(s+1)} \qquad (12.12)$$

حيث s العدد الكمومي السبيني للنكليون، وهو صفة أساسية له كالكتلة والشحنة مثلاً، وقيمته $\frac{1}{2}$. وبذلك تكون القيمة المطلقة لشعاع سبين النكليون $\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$. ويكون عدد المساقط الممكنة لهذا الشعاع على محور اختياري، وليكن oz مثلاً هو $(2s+1)$ أي قيمتين هما $-\frac{1}{2}\hbar$ و $+\frac{1}{2}\hbar$.

12.7.3. الاندفاع الزاوي الكلي للنكليون $\vec{J}$

لكل نكليون اندفاع زاوي كلي $\vec{J}$ حول الاتجاه المختار هو مجموع الاندفاعين الزاويين المداري $\vec{L}$ والسبيني $\vec{S}$ للنكليون أي:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} \tag{12.13}$$

وهو مكمى أيضاً لأن كلاً من $\vec{L}$ و $\vec{S}$ مكمى وهو يأخذ القيم المطلقة التالية

$$\left|\vec{J}\right| = \sqrt{j(j+1)}\,\hbar \tag{12.14}$$

حيث j العدد الكمومي الزاوي الكلي للنكليون، وهو يأخذ القيم التالية:

$$\left.\begin{array}{l} j = l + \frac{1}{2} \\ j = l - \frac{1}{2} \end{array}\right\} \text{عندما } l \neq 0 \tag{12.15}$$

$$j = s = \tfrac{1}{2} \quad \text{عندما} \quad l = 0$$

أي إنه عدد فردي من أنصاف الأعداد الصحيحة.

وكما في حالة $\vec{L}$ و $\vec{S}$ يكون مسقط $\vec{J}$ على محور ما oz مكمى ويأخذ القيم:

$$J_z = -j\hbar, -(j-1)\hbar, \ldots, (j-1)\hbar, j\hbar$$

وهذا يعني أنه يكون من الشكل $J_z = (\frac{n}{2})\hbar$ حيث n عدد صحيح فردي.

12.7.4. الاندفاع الزاوي الكلي للنواة $\vec{J}$ (السبين النووي)

في حالة نواة تحوي أكثر من نكليون يساوي الاندفاع الزاوي الكلي للنواة $\vec{J}$ مجموع الاندفاعات الزاوية الكلية للنكليونات المكونة للنواة وعددها A:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} = \vec{J}_1 + \vec{J}_2 + \ldots = \sum_{i=1}^{A} \vec{J}_i \tag{12.16}$$

ويُطلق على $\vec{J}$ اسم السبين النووي أيضاً. تُعرّف القيمة المطلقة للاندفاع الزاوي الكلي للنواة $\left|\vec{J}\right|$ بأنها أكبر مركبة للشعاع $\vec{J}$ في أي اتجاه محدّد أي:

$$\left|\vec{J}\right| = \hbar\sqrt{j(j+1)} \tag{12.17}$$

حيث j العدد الكمومي الزاوي الكلي للنواة وهو يأخذ القيم:

$$j = |l-s|, \ldots, |l+s| \tag{12.18}$$

حيث l العدد الكمومي المداري الكلي للنواة و s العدد السبيني الكلي للنواة. وتكون مركبة العزم المداري الكلي للنواة $\vec{L}$ على المحور المختار عدداً صحيحاً من $\hbar$. أما مركبة $\vec{S}$ فهي عدد صحيح من $\hbar$ في حالة عدد زوجي من النكليونات. وأما في حالة كون A فردياً فإنّ مركبة $\vec{S}$ تساوي $\frac{n}{2}\hbar$ حيث n عدد فردي. وبالنتيجة تكون مركبة $\vec{J}$ عدداً صحيحاً من $\hbar$ في حالة كون A زوجياً، وهي تساوي $\frac{n}{2}\hbar$ (حيث n عدد فردي) في حال كون A فردياً. وهذا يتفق مع النتائج العملية.

يكمن النجاح الأكبر لنموذج الطبقات، بالإضافة لتفسير وجود الأعداد السحرية، في التنبؤ وبنجاح بقيم سبين $\vec{J}$ النواة في حالتها الأساسيّة. بما أنّ المستوى الموافق للأعداد الكمومية الثلاثة (n,l,j) المملوء تماماً بـ$(2j+1)$ نكليوناً لا يمكن أن يقدّم شيئاً في سبين النواة، لأنّ مجموع مركبات $\vec{J}$ لنكليونات هذه النواة على المحور المختار وليكن OZ مثلاً معدوماً: $\sum_{j=1}^{2j+1} J_{Z,j} = 0$، وبما أن قيمة $(2j+1)$ زوجيّة من أجل النكليونات فإنّنا نتوقّع أنّ النوى بعدد زوجي من البروتونات، وبعدد زوجي من النترونات لها سبين معدوم بينما يتطابق سبين النوى الفردية – الزوجية أو الزوجية – الفردية مع سبين النكليون المنفرد المتبقّي.

بالنسبة للنوى الفردية – الفردية، يقترن اندفاعا البروتون المنفرد والنترون المنفرد المتبقيين، ولكن لا توجد قاعدة تجريبية لهذا الاقتران، وكلّ ما يمكن قوله إنّ الاندفاع الناتج يوافق عدداً كمياً j يحقّق $|j_1 - j_2| \le j \le j_1 + j_2$. في جميع الأحوال وكما رأينا، فإنّ النوى (odd – odd) ما عدا النوى الخفيفة $({}_1^2H,\ {}_3^6Li,\ {}_5^{10}B,\ {}_7^{14}N)$، ليست مستقرّة طاقياً بالنسبة لتفكك بيتا.

وكمثالٍ على تطبيق نموذج الطبقات، لنأخذ السويّات اللازمة لملء كل من ${}_8^{17}O$ وَ ${}_8^{15}O$. تملأ البروتونات الثمانية طبقة أساسيّة بشكلٍ كاملٍ، ولذلك لن تسهم مبدئيّاً في سبين النواة. يتنبأ نموذج الطبقات بأنّ النكليون المنفرد (غير المقترن بثنائية مع نكليون آخر) يحدّد سبين النواة. في حالة ${}_8^{17}O$ يوجد النترون المنفرد في الطبقة $1d_{\frac{5}{2}}$، لذلك وبحسب نموذج الطبقات فإنّنا نتوقّع أن تمتلك الحالة الأساسية لـ ${}_8^{17}O$ سبيناً مساوياً لـ $\frac{5}{2}$. أما بالنسبة لـ ${}_8^{15}O$ فينبغي أن تمتلك حالته الأساسية سبيناً مساوياً لـ $\frac{1}{2}$ (-1)، على اعتبار أنّ النترون المنفرد يوجد في الطبقة $1p_{\frac{1}{2}}$. إنّ هذه القيم المتوقّعة للسبين لهاتين النواتين في حالتيهما الأساسيّة تتوافق تماماً مع القيم المقيسة لهما، وقد شمل هذا التوافق بين القيم المقيسة تجريبيّاً لسبين النوى والقيم التي يتنبّأ بها نموذج الطبقات مجالاً واسعاً من النوكليدات بأعداد كتلة فردية.

12.7.5. العزم المغنطيسي للنواة

نظراً لاحتواء النواة نكليونات مشحونة، ولامتلاكها اندفاعاً زاويّاً كلياً $\vec{J}$ يساوي محصلة اندفاعها الزاوي المداري والسبيني، فإنّه من المتوقّع أن يكون للنواة عزم مغنطيسي $\vec{\mu}$ يتناسب مع الاندفاع الزاوي الكلي $\vec{J}$ للنواة بحيث:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{J} \quad (12.20)$$

يدعى ثابت التناسب γ النسبة الجيرومغنطيسية للنواة، وللسهولة يعبر عن هذا الثابت بالشكل:

$$\gamma = g\,\mu_N \qquad (12.22)$$

حيث g عامل النسبة الجيرومغنطيسية ويسمى μ_N المغنطون النووي وهو يقابل مغنطون بور في الإلكترون μ_B باستبدال كتلة البروتون m_p بكتلة الإلكترون m_e حيث:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.274\times10^{-24}\,J/T \qquad (12.23)$$

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} \qquad (12.24)$$

تدل التجربة على أن العزم المغنطيسي للبروتون يساوي $\mu_p = 2.79\mu_N$، كما تدل على أن العزم المغنطيسي للنترون غير معدوم $\mu_n = -1.9\mu_N$.

يشير ظهور العزم المغنطيسي للنترون وكبر قيمة العزم المغنطيسي للبروتون إلى التناقض مع الفرضية القائلة بنقطية هذه الجسيمات، إذ تشير مجموعة المعطيات التجريبية الحديثة أن لكل من البروتون والنترون بنية معقدة غير متجانسة، ويعتقد بعض العلماء بأن النترون يضم شحنة موجبة في مركزه، وشحنة سالبة على سطحه تساويها في المقدار، ولما كان العزم المغنطيسي لا يتحدد فقط بمقدار شدة التيار بل يتحدد أيضاً بالمساحة التي يغطيها، فإن العزمين المغنطيسيين الناجمين لن يكونا متساويين، الأمر الذي يجعل للنترون عزماً مغنطيسياً على الرغم من اعتداله الكهربائي.

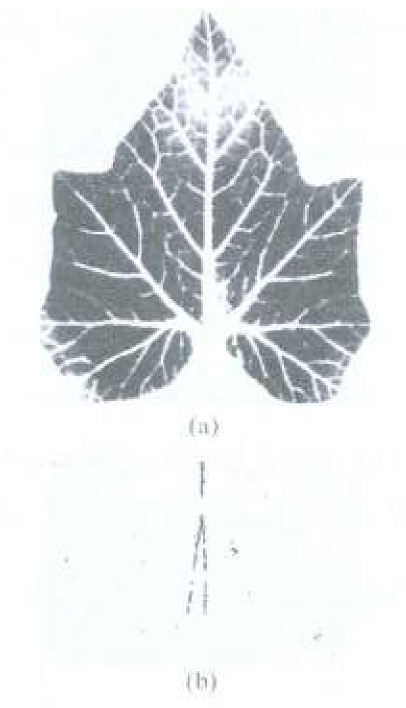
وأخيراً يتنبأ نموذج الطبقات للنواة الذرّيّة أيضاً بشكلٍ معقول بقيم عزم ثنائي القطب المغنطيسي للنواة. وهنا أيضاً تعدم العزوم المغنطيسيّة لأزواج النكليونات المتماثلة كالسبينات بعضها البعض وينجم عن ذلك انعدام العزم المغنطيسي للنوى ذات الأعداد الزوجية من البروتونات والنترونات (even – even)، بينما يساوي العزم المغنطيسي للنوى ذات الأعداد الزوجية من البروتونات والفردية من النترونات (odd – even) أو العكس (even – odd) العزم المغنطيسي للنكليون المنفرد المتبقي.

الفصل الثالث عشر

النكليدات الإشعاعية والطب النووي

Radionuclides & Nuclear Medicine

يشيع استخدام النكليدات أو النظائر ذات النشاطية الإشعاعية في البحوث الحيوية والطبية قفاءات tracers تقتفي أثر التفاعلات الحيوية والفيزيولوجية. يتم عملياً إدخال أحد النظائر المشعة كالكربون $^{14}_{6}C$ أو التريتيوم $^{3}_{1}H$ في الجزيئات التي تحقن في الجسم. إذ يمكن تعقب الجزيئات الموسومة في أثناء حركتها في العضوية أو عندما تخضع إلى تفاعلات كيميائية. يمكن الكشف عن وجود هذه الجزيئات الموسومة (أو عن أجزاء منها إذا كانت تخضع لتحول كيميائي) بعداد غايغر Geiger أو بعدّاد ومضاني scintillation counter، يكشف عن الإشعاع الصادر. يمكن بهذه الطريقة تعقب آلية هضم الأطعمة، إذا أخذت فموياً، أو أعضاء الجسم التي تتوزع فيها إذا أخذت بطرائق أخرى. فقد استخدمت قفاءات النشاطية الإشعاعية في تحديد آلية اصطناع الحموض الأمينية والمركبات الأساسية الأخرى في العضوية. كما يمكن تحديد نفوذية جدران الخلية لمختلف الجزيئات والإيونات باستخدام النظائر الإشعاعية: حيث يتم حقن الجزيء أو الإيون الموسوم في المائع خارج الخلوي، وتقاس النشاطية الإشعاعية الموجودة داخل الخلية وخارجها بدلالة الزمن.



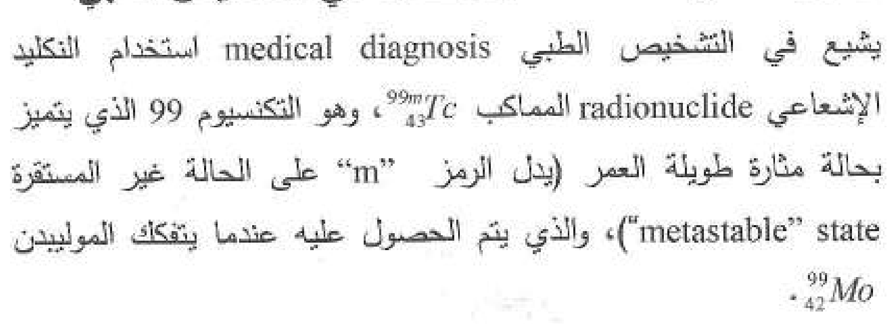
الشكل13.1. (a) صورة شعاعية ذاتية لورقة نباتية تعرضت لـ $^{14}CO_2$ مدة ثلاثين ثانية. (b) صورة تظهر انقسام الدنا

13.1. التصوير الشعاعي الذاتي autoradiography

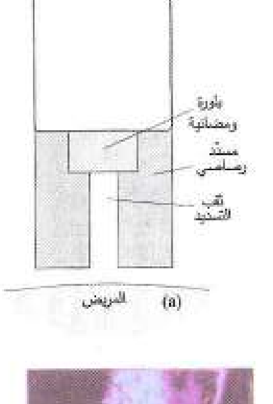
تكشف هذه التقنية عن مواقع النظير المشع على فلم. تعد هذه التقنية مفيدة جداً في تعقب طرائق انتقال الغذاء في النباتات. يمكن مثلاً مراقبة توزع الكاربوهدرات التي يولدها ثنائي أكسيد الكربون الممتص في أوراق النباتات، بالإبقاء على النبات في جو من غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 الذي تكون ذرة الكربون فيه النظير $^{14}_{6}C$. توضع ورقة نباتية، بعد ذلك، بإحكام على فلم تصوير ضوئي فيؤدي الإشعاع الصادر إلى تعتيم الفلم بشكل أكبر حيث يتركز النظير. يبين الشكل13.1. صورة شعاعية ذاتية لورقة نباتية تعرضت لـ $^{14}CO_2$مدة ثلاثين ثانية. وقد أصبح

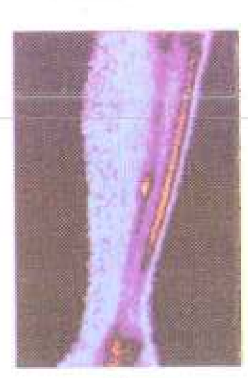
نسيج التركيب الضوئي (الأخضر) نشِطاً إشعاعياً ومسوِّداً لفلم التصوير الضوئي (فلم التصوير الشعاعي بالأشعة السينية)؛ وأما نسيج العروق الذي لا يقوم بالتركيب الضوئي الخالي من ^{14}C فلا يُسوِّد فلم التصوير الضوئي. وقد كشف التصوير الشعاعي الذاتي باستخدام النكليوتيدات الموسومة (مكوّنات الدنا) تفاصيل كثيرة عن استنساخ الدنا.

13.2. النكليدات الشائعة المستخدمة في التشخيص الطبي



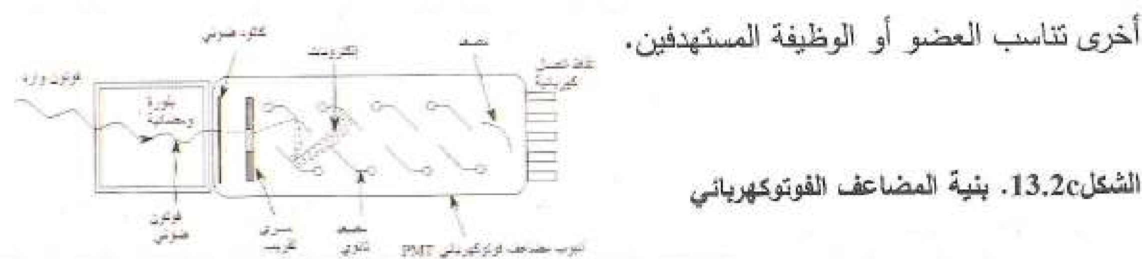
يشيع في التشخيص الطبي medical diagnosis استخدام النكليد الإشعاعي radionuclide المماكب $^{99m}_{43}Tc$، وهو التكنسيوم 99 الذي يتميز بحالة مثارة طويلة العمر (يدل الرمز "m" على الحالة غير المستقرة "metastable" state)، والذي يتم الحصول عليه عندما يتفكك الموليبدن $^{99}_{42}Mo$.





الشكل13.2.(a) كاشف لأشعة غاما مسدَّد، يمسَح به الجسم. (b) صورة بكاميرا غاما لساق تعاني كسر التعب بالكشف عن أشعة غاما الصادرة من $^{99m}_{43}Tc$ (الصورة بالألوان الاصطناعية).

يكتسب الـ $^{99m}_{43}Tc$ أهميته من ملاءمة عمر نصفه الذي يبلغ 6h ست ساعات، المدة الكافية لتحضير المريض وتصويره، ومن حقيقة إمكان اتحاده مع عدد كبير من المركبات. ومِنْ ثَمَّ يتم اختيار المركب الذي يجب وسمه بالنكليد الإشعاعي بحيث يتركز في العضو أو المنطقة التشريحية التي تجب دراستها. تسجل الكواشف توزع المركب الموسوم والفعال إشعاعياً أو تصوره من خارج الجسم. يمكن إجراء الكشف بكاشف وحيد (الشكل13.2a)، مكون من بلورة ومضانية مرتبطة بمضاعف فوتوكهربائي (الشكل13.2c). فيحرّك الكاشف فوق الجسم ويقيس شدة النشاطية الإشعاعية في عدد كبير من النقاط. تمثل الصورة الحاصلة الشدة النسبية للنشاطية الإشعاعية في هذه النقاط. تعد النشاطية الإشعاعية النسبية أداة تشخيصية جيدة. يمكن لزيادة النشاطية الإشعاعية أو انخفاضها مثلاً أن تمثل زيادة في نشاطية العضو overactivity أو انخفاضاً underactivity فيها أو يمكن أن تمثل في حالة أخرى إصابة أو ورماً. وتستعمل نكليدات أخرى تناسب العضو أو الوظيفة المستهدفين.



الشكل13.2c. بنية المضاعف الفوتوكهربائي

13.3. الطب النووي

الطب النووي هو أحد التخصّصات الطبّية التي تعتمد على استخدام مواد مشعّة في تشخيص الأورام أو معالجتها. ويشمل الطبّ النوويّ تقنيّات خاصّة بالتصوير الطبّي التشخيصي وأخرى تتعلّق بمعالجة الأورام.

يُمكننا القول: إنّ ولادة الطبّ النوويّ تعود إلى اكتشاف النشاطية الإشعاعية الصنعيّة على يد Frédéric Joliot-Curie وَ Irène Joliot-Curie عام 1934، وذلك عندما تمكّنا من توليد نظيرٍ مشعٍّ بتشعيع رقاقة من الألمنيوم بجسيمات ألفا صادرة عن منبع البولونيوم. وفي عام 1946 تمّ إنتاج أوّل نظير مشع في مخبر Oak Ridge الوطني في الولايات المتحدة الأمريكية لأغراضٍ طبّيّة.

وقد بدأ استخدام الطبّ النوويّ في المستشفيات بالانتشار في الخمسينيّات من القرن الماضي، وترافق هذا الانتشار مع زيادة المعرفة العلمية في مجال توليد النظائر المشعّة، والكشف عن الإشعاع، وكذلك تطوّر المعرفة والتقنيّات في مجال استخدام النظائر المشعة لتتبّع العمليات الكيميائيّة الحيويّة في جسم الإنسان. وهنا نذكر ابتكار أنجيه Hal O. Anger للكاميرا التي أصبحت تعرف باسمه، أو ما يُعرف حالياً باسم غاما كاميرا، التي فتحت الطريق واسعاً أمام تقنيّات التصوير التشخيصيّ في الطبّ النوويّ.

كاميرا آنجيه والتصوير الومضاني

تتضمن كاميرا غاما الأكثر تعقيداً عدداً كبيراً من الكواشف التي تسجل النشاطية الإشعاعية في العديد من النقاط في الوقت نفسه، وهي الكاميرا التي أصبحت تعرف حالياً باسم غاما كاميرا (المصوّرة غاما)، وفتحت الطريق واسعاً أمام تقنيّات التصوير التشخيصيّ في الطبّ النوويّ. يمكن عرض الشدات المقيسة على شاشة تلفزيون أو حاسب، كما تسمح بإجراء دراسات دينميكية (أي من خلال الصور التي تتغير بدلالة الزمن). تجد في الشكل13.3a مخططاً لكاميرا أنجيه الغاماوية. إذْ يتراكم النظير المشع في موقع الورم ويصدر أشعة غاما، ويتم الكشف عن الفوتونات التي تعبر ثقوب صفيحة التسديد الرصاصية. وتجد في الشكل13.3b صورة لكاميرا آنجيه برأسي كشف. أحد الرأسين فوق صدر المريضة في حين يقع الرأس الثاني إلى يسارها.

الشكل13.3. كاميرا آنجيه الغاماوية(b).

ويُعدّ التكنسيوم ^{99m}Tc 99m، من أهم النظائر المشعّة الطبّيّة، التي اكتشفها كل من C. Perrier و E. Segre أوّلَ مرّة في عام1937، ومن ثمّ جرى ابتكار مولّدات التكنسيوم في الستّينيّات من القرن الماضي لمواكبة الاستخدام المتزايد لهذا النظير في تقنيّات التصوير الطبي النووي. وفي السبعينيّات من القرن الماضي تمّ الاعتراف رسمياً من قبل الهيئات والجمعيات الطبّيّة العالميّة بالطبّ النوويّ واعتباره تخصّصاً قائماً بذاته في الطب البشري. ومنذ ذلك الوقت مازالت الأبحاث تجري في هذا المجال لتطوير التقنيّات المختلفة بهدف تحسين القدرة التشخيصيّة والعلاجيّة من جهة، وتوسيع مجال استخدام الطبّ النوويّ ليشمل حالات مرضيّة جديدة، وهنا نذكر التطوّر الكبير الذي شمل دراسة أمراض القلب ووظائفه باستخدام تقنيّات التصوير النوويّ كالـSPECT التي سنأتي على شرحها لاحقاً، والصيدلانيّات الإشعاعيّة التي تمّ تطويرها لهذا الغرض.

13.4. التصوير الطبي النووي التشخيصي

يعتمد التصوير التشخيصيّ في الطبّ النوويّ Diagnostic nuclear medical imaging على إعطاء المريض مادّة دوائيّة مناسبة، تُعرف باسم الصيدلانيّة الإشعاعيّة radiopharmaceutical، وهي عبارة عن جزيئات بيولوجيّة يتمّ وسمها بنظيرٍ مشعٍّ، إمّا بشكلٍ فموي وإمّا عن طريق الحقن الوريديّ، ومن ثمّ يتمّ الكشف عن الإشعاع الصادر عن هذه المادّة في جسم المريض باستخدام كواشف خارجية مثل كاميرات غاما Gamma camera، للحصول على الصورة التشخيصيّة للعضو المستهدف. وهذا التصوير يختلف كثيراً عن التصوير التشخيصيّ باستخدام الأشعّة السينيّة التي تعبر العضو المراد تصويره ويجري فيه الكشف عن الأشعّة التي تنفذ من جسم المريض.

تتوافر في هذا المجال تقنيّات متعدّدة، نذكر منها:

13.4.1. التصوير الومضاني التشخيصي

نحصل في التصوير الومضاني Scintigraphy على صور ثنائيّة البعد للجزء المصوّر من جسم المريض، ومن أهمّ الحالات التي يلجأ فيها الطبيب إلى هذه التقنيّة أمراض العظام بأنواعها المختلفة كالكسور الناجمة عن الحوادث أو الإجهاد، والالتهابات العظميّة وصولاً إلى سرطان العظم.

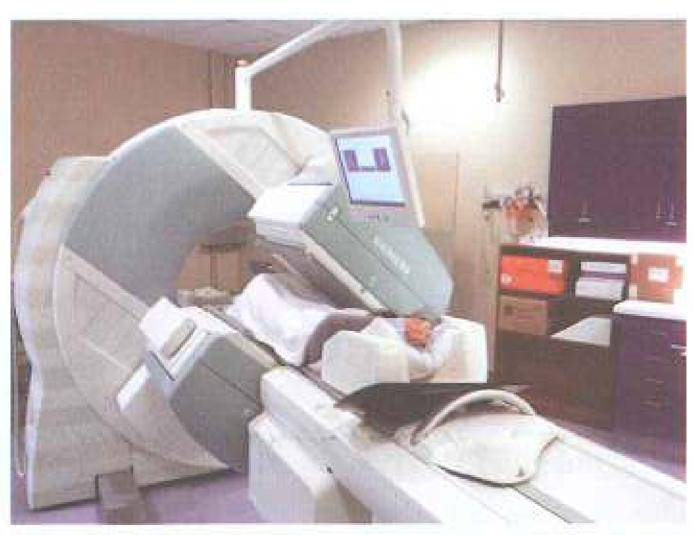
كما يُستخدم التصوير الومضاني، للكشف عن الحالات المرضيّة للشرايين الإكليلية ويسمح بتقييم الحالة الوظيفيّة للعضلة القلبيّة بشكلٍ عام، تستخدم فيه مادة دوائية موسومة بمماكب التكنسيوم ^{99m}Tc.

ومن الحالات الشائعة طبيّاً لاستخدام التصوير الومضاني، أورام الغدّة الدرقيّة، ويمكن في هذه الحالة استخدام مماكب التكنسيوم ^{99m}Tc، أو اليود المشعّ ^{123}I. كما يلجأ الأطباء في بعض الحالات إلى استخدام اليود المشعّ ^{123}I في الكشف عن بعض أمراض الغدّة الدرقيّة مثل فرط نشاط الغدّة.

13.4.2. التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون

تُعتبر تقانة التصوير المقطعي المحوسب بالإصدار الأحادي الفوتون Single Photon Emission Computed Tomography- SPECT أو الـ SPECT، من أهم تقنيّات التصوير في الطبّ النوويّ، وتتميّز من التصوير الومضانيّ التقليديّ بإمكانيّة الحصول على صورة ثلاثيّة البعد للعضو المصوّر، وتعتمد في ذلك على تصوير مقاطع عرضيّة عديدة للمنطقة المراد تصويرها ومعالجة الصور وإعادة بنائها حاسوبيّاً باستخدام برمجيات خاصة.

نحتاج لتطبيق هذه التقنيّة، كما في حالة التصوير الومضانيّ، إلى إعطاء المريض نظيراً مشعّاً مصدراً لأشعة غاما، ويجري ذلك عادةً بواسطة الحقن الوريدي. يكون النظير المشعّ المستخدم، في بعض الأحيان، عبارةً عن أيون قابل للذوبان في محلولٍ مناسب للحقن الوريدي كنظير الغاليوم (Gallium) مثلاً، إلّا أنّه، في غالب الأحيان، يُحقن المريض قبل التصوير بالصيدلانيّة الإشعاعيّة المناسبة (أي المركّب المكوّن من المادة العضوية الموسومة بالنظير المشع). ويتم الكشف عن تركيز المادة المشعة في جسم المريض باستخدام كاميرا غاما.



الشكل13.4. جهاز الـSPECT المزوّد برأسي كاميرا غاما للتصوير المقطعي لكامل الجسم (تشخيص أمراض العظام).

تسمح تقانة الـ SPECT بمراقبة مستوى النشاط البيولوجي في كلّ موضعٍ من المنطقة المصوّرة، إذْ تدلّ الإشعاعات الصادرة عن النظير المشع على مقدار تدفّق الدمّ في الأوعية الشعريّة، وبما أنّ الصورة التي نحصل عليها باستخدام كاميرا غاما عبارة عن مسقط ببعدين لتوزّع النظير المشعّ في المنطقة المصوّرة، يجري أخذ عدد كبير من هذه الصور ذات البعدين (المساقط) من زوايا مختلفة، ويستخدم الحاسوب لبناء الصورة ثلاثية البعد باستخدام برمجيات خاصة لذلك. نرى هنا التشابه بين هذه التقنيّة وتقنيّات التصوير الأخرى كالتصوير بالتجاوب المغنطيسي MRI (الفصل22) أو التصوير الطبقي المحوري بالأشعة السينية X-ray CT (الفصل5)، وكذلك التصوير بالإصدار البوزتروني PET الفقرة التالية)، إذْ تُعالج المعطيات المتضمّنة في الصور المقطعيّة للتمكّن من رؤية تفاصيل مقاطع رقيقة على طول المحور المصوّر لجسم المريض.

تستخدم، لإجراء التصوير بتقنية الـ SPECT، الصيدلانيّات المشعّة نفسها المستخدمة في التصوير الومضاني ثنائيّ البعد، ذلك أنّ كلتا التقنيّتين تعتمدان كاميرا غاما لتسجيل الإشعاع الصادر عن جسم المريض، إلا أنّه في حالة التصوير المقطعي بالإصدار الأحادي الفوتون، يتم تدوير كاميرا غاما حول المريض، وتؤخذ الصور المقطعية (المساقط) عند نقاط محددة أثناء الدوران (تقريباً كلّ 6-3 درجات). وفي معظم الحالات يجري أخذ الصور على دورة كاملة حول جسم المريض (360 درجة)، مما يساعد على أمثلة عملية معالجة الصور وبناء الصورة ثلاثية البعد والوصول إلى الدقّة المطلوبة. تستغرق عملية التصوير نحو 15-20 s للمقطع الواحد، مما يعطي زمن تصوير كلّي نحو 20 min -15.

يلجأ الأطباء إلى التصوير المقطعي بالإصدار الأحادي الفوتون لاستكمال التشخيص عندما لا يكون التصوير الومضاني كافياً، إذْ تساعد الصورة ثلاثية البعد على تحديدٍ مكانيٍ أكثر دقّة لورمٍ أو لمنطقة التهابية في جسم المريض، كما يمكن الوصول إلى معلومات دقيقة عن الحالة الوظيفية لبعض الأعضاء الداخلية كالعضلة القلبيّة والدماغ، وفيما يلي بعض الحالات التي يستخدم فيها الأطباء هذه التقنيّة في التشخيص:

تصوير تروية العضلة القلبية Myocardial perfusion imaging(MPI): وهو تصوير وظيفي، يستخدم لتشخيص أمراض القلب، ويعتمد على مبدأ أنّ العضلة القلبية المريضة تتلقّى تدفقاً دموياً أقلّ من العضلة السليمة في حالة الإجهاد.

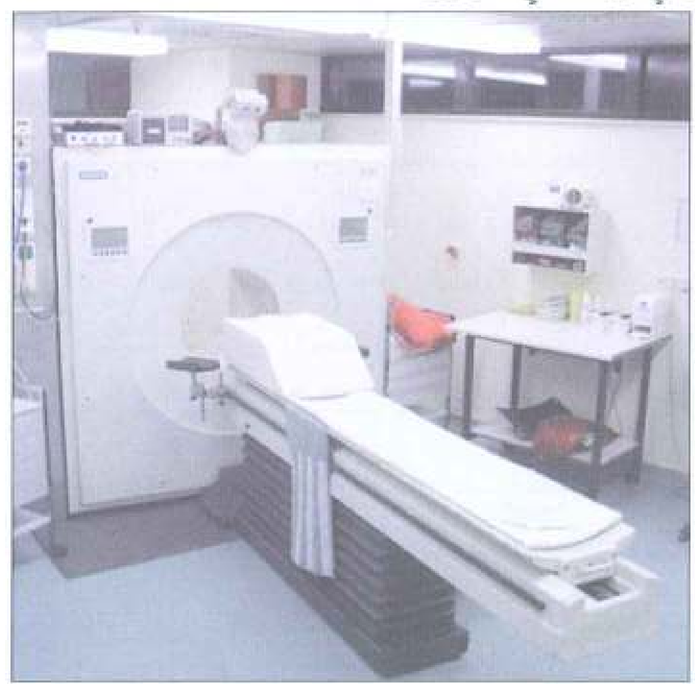
يُحقن المريض بالمادة الدوائيّة الموسومة بالنظير المشع كالـ ^{99m}Tc، وبعد ذلك يُرفع معدّل نبض القلب لتحريض إجهاد العضلة القلبية عن طريق تمرينات رياضيّة، أو بشكلٍ دوائيّ. تُجرى عملية التصوير بعد الإجهاد للكشف عن توزّع المادّة الدوائيّة الموسومة، ومِنْ ثَمّ لتقييم تدفّق الدم إلى المناطق المختلفة من العضلة القلبية. يجري الطبيب التشخيص من خلال مقارنة الصور المأخوذة بعد إجهاد العضلة القلبية بصورٍ أخرى مأخوذة في حالة الراحة، ويمكن في كثير من الأحيان أخذ مجموعتي الصور في اليوم نفسه.

تصوير الدماغ الوظيفي Functional brain imaging (FBI): من أكثر الصيدلانيّات الإشعاعيّة استخداماً لتصوير الدماغ الوظيفي، القفّاء مصدر غاما ^{99m}Tc-HMPAO hexamethylpropylene amine oxime. يتمّ وسم الجزيء العضوي HMPAO بالمماكب المشع ^{99m}Tc ممّا يساعد على تركّز الصيدلانيّة الإشعاعية المحقونة في أنسجة الدماغ بشكلٍ يتناسب مع تدفّق الدم إليها. وهذا ما يسمح بتقييم تدفّق الدم في الدماغ من خلال الكشف عن أشعة غاما الصادرة عن النظير المشع ^{99m}Tc باستخدام كاميرا غاما.

في الحقيقة، يرتبط تدفّق الدم في الدماغ بشكلٍ قوي بالنشاط الاستقلابي واستهلاك الطاقة، لذلك يمكن باستخدام القفّاء المشع ^{99m}Tc-HMPAO تقييم هذا النشاط في مناطق الدماغ المختلفة، ممّا يساعد على الكشف عن حالات مرضية فيه وقد بيّنت دراسات علمية عديدة أنّ دقّة تقانة التصوير بالإصدار الأحادي الفوتون في تشخيص مرض الزهايمر الذي يصيب بعض المسنّين أعلى من دقّة الاختبارات الطبية التقليدية للكشف عن هذا المرض.

تستخدم تقنيّة التصوير المقطعي بالإصدار الفوتوني الأحادي نظائر مشعّة بأعمار نصف طويلة نسبياً، كما أنّ التجهيزات الخاصة بهذه التقنية أقل تكلفة من التجهيزات الخاصة بتقنية أخرى منافسة هي الـPET. حيث يتمّ استخلاص الـ ^{99m}Tc بشكلٍ سهل نسبياً من مولّدات التكنسيوم 99m، ويتمّ تزويد المشافي ومراكز التصوير بهذه المولّدات بشكلٍ أسبوعيٍّ.

13.4.3. التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو الثنائي الفوتون



الشكل13.5. جهاز التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني أو PET.

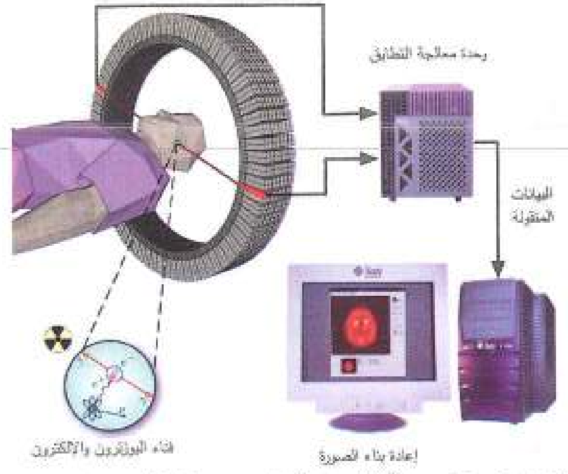
التصوير المقطعي البوزتروني Positron Emission Tomography- PET أو Two Photon Emission Tomography- TPET تقنيّة تصوير وظيفي تُستخدم في الطبّ النوويّ وتسمح بالحصول على صورة ثلاثيّة البعد للعمليات الوظيفية في جسم المريض. في هذه التقنيّة، يتمّ حقن المريض بالصيدلانيّة الإشعاعيّة (وهي جزيء بيولوجي موسوم بنظير مشع مصدر للبوزترونات أو أشعة بيتا الموجبة)، ومن ثمّ يتمّ الكشف عن زوج الفوتونات غاما الصادرة عن اتّحاد البوزترون بعد فقده لطاقته الحركية مع إلكترون في تفاعل الفناء Annihilation Reaction.
هنا أيضاً نحصل على صور لتوزّع المادة المشعّة في جسم المريض، وتتمّ معالجة هذه الصور وإعادة بنائها حاسوبياً للوصول إلى الصورة التي تسمح بالتشخيص الطبي.

يتشابه التصوير المحوسب بالإصدار الفوتوني الأحادي أو الـ SPECT مع التصوير بالإصدار البوزتروني أو الـ PET، إلّا أنّ الفرق الأساسيّ بين التقنيّتين يعود إلى أنّ النظائر المشعّة المستخدمة في التصوير بالإصدار الفوتوني الأحادي، تصدر أشعة غاما بشكلٍ مباشر بينما تُصدر النظائر المستخدمة في

التصوير بالإصدار البوزتروني بوزترونات لا تلبث أن تفنى لينتج عنها فوتونا غاما طاقة كلٍّ منهما 0.511 MeV، باتّجاهين متعاكسين. يساعد هذا الإصدار المتزامن لزوج الفوتونات على إعطاء معلومات أكثر دقّة عن الإشعاع الصادر من حيث مكان الإصدار، وهذا يسمح بالحصول على مقدرة فصلٍ مكانيّة spatial resolution power عالية في صور الإصدار البوزتروني.

تستخدم تقانة التصوير بالإصدار البوزتروني مجموعة من النظائر المشعة مصدرة للبوزترونات ذات أعمار نصف قصيرة نسبياً كالكربون11 $^{11}_{6}C$ (20min)، والأكسجين15 $^{15}_{8}O$ (2min)، الفلور 18 $^{18}_{9}F$ (110min)، والآزوت13 $^{13}_{7}N$ (10min)، يجري تضمين هذه النظائر المشعة في مركبات يستهلكها جسم الإنسان كالغلوكوز والماء. ومن ناحية عملية، ونظراً لقصر أعمار النصف للمصدرات البوزترونية، يتمّ إنتاج هذه الأخيرة باستخدام مسرّعات ينبغي أن توجد في نفس المراكز الطبيّة، وتحضير الصيدلانيّات المشعّة أيضاً فيها ممّا يرفع تكاليف هذا النوع من التصوير التشخيصي.

في معظم حالات التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني يُستخدم الـ FDG fluorodeoxyglucose وهو جزيء شبيه السكر الموسوم بالمصدر البوزتروني ^{18}F، لحقن المريض قبل إجراء التصوير، ويدلّ توزّع النظير المشعّ ^{18}F، في المنطقة المصوّرة على نشاط النسيج الاستقلابي بالاعتماد على امتصاص هذا النسيج لمادة الغلوكوز.



الشكل13.6. مخطّط لعملية التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني والحصول على الصورة بالحاسوب.

يقطع البوزترون الصادر مسافة لا تتجاوز بضعة ملمترات في النسيج، يفقد خلالها طاقته الحركية، قبل أن يتّحد مع إلكترون في تفاعل الفناء منتجاً زوجاً من الفوتونات غاما. يقوم الكاشف الوميضي في جهاز التصوير بالكشف عنهما بشكلٍ متزامن. ينتج عن عملية الكشف ومضة ضوئية، يجري تحويلها إلى إشارة كهربائية في المضاعفات الضوئية التي تقوم أيضاً بتضخيم الإشارة الكهربائية في مساريها المتعدّدة، ويستخدم في بعض الأحيان ديودات ضوئية من السلكون لنفس الغاية.

آلية الكشف عن فوتونات التفاني

لانتقال الفوتونين على خط واحد وفي اتجاهين متعاكسين، فإنه يتم الكشف عن تطابقهما بحلقة من الكواشف التي تحيط بالمريض (الشكل13.6)، فيها ترابط إلكتروني بين كل كاشفين متقابلين. إذا أمكن

تحديد الفارق في زمن وصول الفوتونين بدقة، يمكن حساب الموقع الفعلي للنكليد المصدر وفق ذلك لنظير المصدر للبوزترونات في العضو المصور، صورة الدماغ التي تظهر على شاشة الحاسوب في الشكل13.6.

تستخدم تقنيات التصوير المقطعي بالإصدار البوزتروني، إلكترونيات مماثلة لتقنيات التصوير المقطعي بالأشعة السينية، في بناء صور التصوير المقطعي البوزتروني PET، بمقدرة فاصلة من مرتبة 3-5mm. من أهم مزايا الـ PET أنه ليس ثمة حاجة لمسددات (كما هو الحال لدى الكشف عن فوتون وحيد). ومِنْ ثَمَّ يضيع عدد أقل من الفوتونات ويمكن إعطاء المريض جرعات أقل بالـ PET.



الشكل 13.7a. يستخدم التصوير المقطعي البوزتروني حلقة من الكواشف الومضانية في الحالة النموذجية مقترنة بمضاعفات فوتوكهربائية في الكشف عن شعاعي الفناء البوزتروني $e^{+}+e^{-}\rightarrow 2\gamma$ الصادرين في اتجاهين متعاكسين.

يمكن لكل من التقنيتين PET وSPECT أن تعطي صوراً ترتبط بالكيمياء الحيوية والاستقلاب والوظيفية. يجب مقارنة هذه الصور بمسوحات الأشعة السينية، التي تعكس صورها شكل وبنية المنطقة المصورة، أي تشريحيتها.

ولما كان فوتونا الفناء يسيران بسرعة الضوء، أمكن الكشف عنهما كنبضتين متطابقتين على زوجين متقابلين من الكواشف الوميضية (الشكل13.7a)، يمكن استنتاج توزع النظير المصدر للبوزترونات في الدماغ، بمعالجة توزع التطابقات بين الكواشف التي تشكل في مجموعهما الكاميرا البوزترونية (الشكل13.7b).

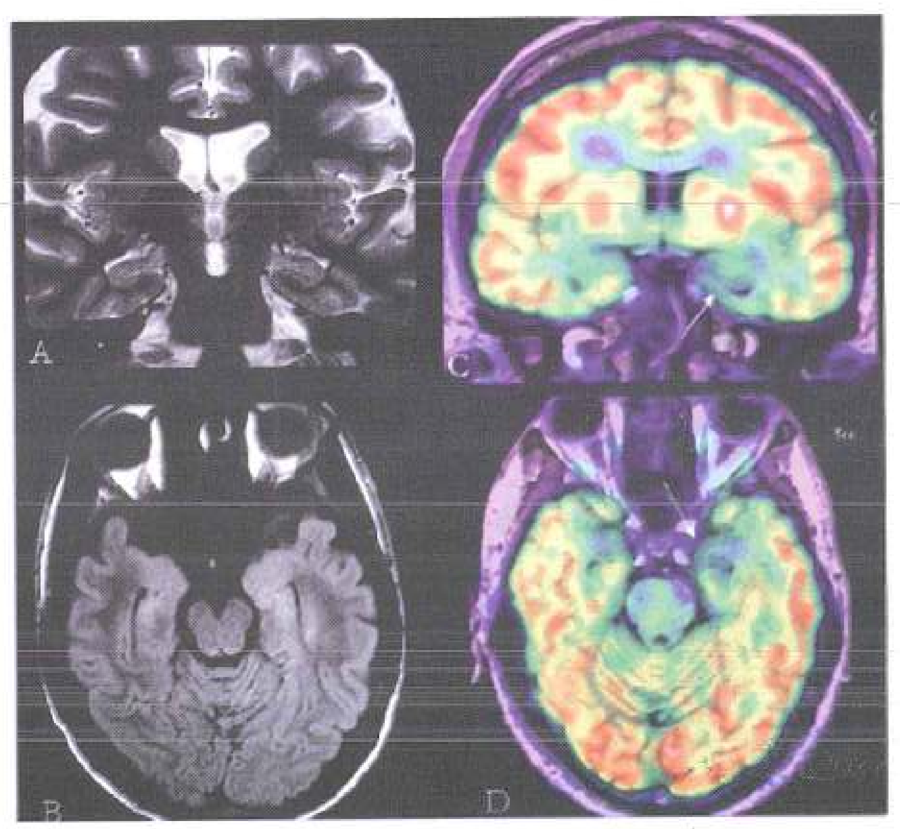
الشكل 13.7b. توزّع نظير المصدر للبوزترونات في الدماغ، والحصول على صورة وظيفيّة.

إن تطبيقات هذه التقانة عديدة. ولكن أهمها استخدام ديوكسي غلوكوز الموسوم بالفلور-18 للتعرف على باحات الدماغ المعنية بوظيفة معينة من خلال مخطط يبين استهلاك الطاقة (الغلوكوز) في خلايا الدماغ. فعندما يمزج الغلوكوز مع ديوكسي الغلوكوز (مماثل له لكنه غير قابل للاستقلاب) يتراكم هذا الأخير في الخلايا المستهلكة للغلوكوز. فإذا ما وسم ديوكسي غلوكوز بالفلور-18 المصدر للبوزترونات تغدو المناطق النشيطة فيزيولوجيا أشد إصداراً للبوزترونات من المناطق الأقل نشاطاً

ومِنْ ثَمّ يمكن تتبع منطقة معينة في الدماغ بالتصوير المقطعي البوزتروني الذي يظهر بوضوح مناطق الدماغ الفعالة في وظيفة معينة أثناء تعرض الفرد لتنبيهات حسية أو سمعية أو بصرية معينة.

كما تستعمل هذه التقنية في تصوير الأورام أو ما يُطلق عليه طبيّاً اسم Oncology. ويطلق على مجمل تقنية التصوير طبياً اسم FDG-PET. تمتصّ الخلايا المستهلكة للغلوكوز هذه المادة، وتحوّلها إلى فوسفات عضوي باستخدام الهيكزوكيناز الذي ترتفع نسبته كثيراً في الأورام الخبيثة، ممّا يسمح بكشفها.

وبشكلٍ عام تعتمد هذه التقنية على امتصاص الخلايا لـ FDG وتفكك الفلور المشع فيها وإصدار البوزترون، ممّا يعطي نشاطية إشعاعيّة عالية للخلايا ذات الاستهلاك العالي للغلوكوز يمكن تمييزه في الصور المأخوذة. ويلجأ أيضاً الأطباء إلى استخدام هذه التقنية للكشف عن بعض الحالات المرضية للدماغ كمرض الزهايمر وللعضلة القلبية (أخطار حدوث السكتات القلبية)، وجهاز الدوران كمرض تصلّب الشرايين.



الشكل 13.8. A وB صورتان بالرنين المغنطيسي لشخص مصاب بالصرع باستخدام تعاقبين مختلفين من تعاقبات نبضات التواتر الراديوي المستخدمة في الرنين المغنطيسي، لم يظهر فيهما أي تغير. أما الصورتان المقطعيتان التاجية والمحورية اللتان تم الحصول عليهما بالتسجيل المشترك لـ PET/MRI فتظهران منطقة في الحصين إلى اليسار (السهم في كل صورة) فيها انخفاض في المعدل الاستقلابي.

تزداد في الآونة الأخيرة الاستخدامات الطبية للأجهزة متعدّدة الوظائف، فمثلاً تتوافر حالياً أجهزة يطلق عليها اسم ماسحات "PET-CT"، وهي تستخدم للحصول على صورة تشريحيّة وظيفيّة بآنٍ واحد للعضو

أو للبنية المصوّرة من جسم المريض. ويمكن باستخدام هذه الأجهزة الحديثة من إجراء عمليتي التصوير PET و CT دون الحاجة لتغيير وضعية المريض ، ممّا يساعد الطبيب على الربط الدقيق بين أي شذوذ وظيفي تم كشفه بالتصوير البوزتروني مع البنيةّ التشريحية التي توفّرها صورة الـ CT.

كما تتوافر أيضاً حالياً أجهزة متعددة الوظائف يُطلق عليها اسم "PET-MRI scanner" تُستخدم بشكلٍ أساسي لتصوير الدماغ الوظيفي التشريحي بآنٍ معاً. وتتوافر أيضاً إمكانية معالجة صور الـ CT وصور الـ PET و صور الـ MRI المأخوذة من أجهزة تصوير منفصلة، بشكلٍ مشترك لإجراء تشخيص متكامل باستخدام جهاز يُعرف باسم N-localizer.

13.5. الطب النووي العلاجي

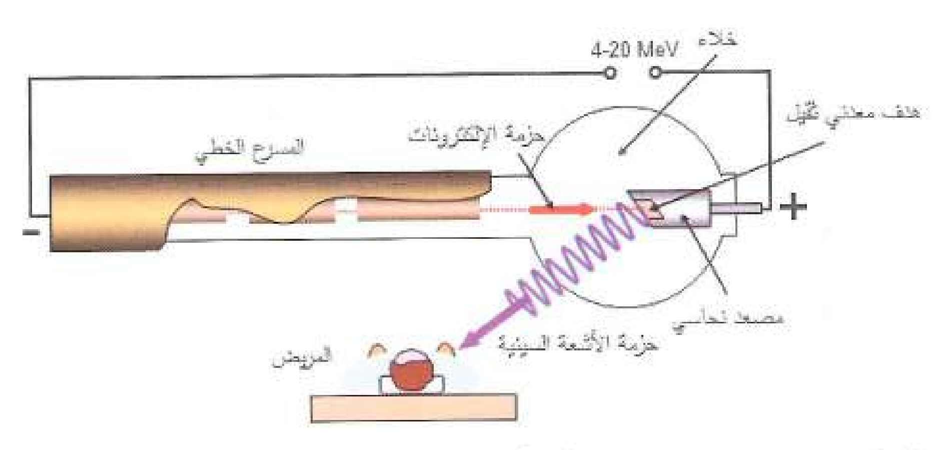
نقصد بالطب النووي العلاجي Interventional nuclear medicine استخدام الأشعّة المؤيّنة، أو النظائر المشعة لعلاج بعض الحالات المرضية كفرط نشاط الغدة الدرقية وبعض أمراض الدم. إلا أنّ معالجة الأورام تبقى من أهم التطبيقات الطبية للأشعة القادرة بفعل قدرتها التأينية العالية على إتلاف الخلايا الخبيثة بشكلٍ فعّال. كما يمكن أن تساعد المعالجة الإشعاعية Radiation Therapy على إتلاف ما تبقّى من الخلايا السرطانية، بعد الاستئصال الجراحيّ للأورام، ويلجأ الأطباء إلى العلاج بالأشعة في بعض الأحيان لتخفيف الآلام المرافقة للأورام، وهذا ما يطلق عليه اسم Palliative radiation therapy.

يتوافر في المعالجة الإشعاعية نوعان أساسيّان:

13.5.1. المعالجة عن بعد، أو باستخدام حزمة إشعاعية خارجية

يستخدم في طريقة المعالجة عن بعد External-beam radiation therapy مسرّع خطّي طبّي Linac، لتوليد الحزمة الإشعاعية اللازمة للمعالجة، وهي إما حزم فوتونية (أشعة سينية عالية الطاقة: X-ray Beam 1-15 MeV)، وإمّا إلكترونية (إلكترونات عالية الطاقة: Electron Beam 1-18 MeV). ويزوّد الحاسوب المرتبط بالمسرّع ببرمجيّات خاصة، من شأنها تحديد حجم وشكل الحزمة الإشعاعية وتوجيهها باتجاه الورم لتخفيف الآثار الضارة التي يمكن أن تلحق بالخلايا المجاورة. تُعالج الأورام السطحية القريبة من الجلد، والعميقة باستخدام الحزم الفوتونية، ويمكن التحكّم بطاقة الحزمة بحسب العضو أو النسيج المستهدف في المعالجة، أما الحزم الإلكترونية فتستخدم لمعالجة الأورام القريبة من السطح لقدرتها الاختراقية المنخفضة للنسيج الحي، وتركّز معظم الجرعة الإشعاعية في الملمترات الأولى من جسم المريض. وفي بعض الحالات تُستخدم بعض المصادر الإشعاعية للمعالجة عن بعد، كمصدر الكوبالت 60 الذي يصدر فوتونات غاما بطاقة عالية (1.17, 1.33 MeV)، ممّا يسمح باستخدامه في علاج بعض أورام الرأس Gamma Knife. يبيّن الشكل13.9 أهم أجزاء المسرّع الخطي الطبي، وآلية

إصداره للأشعة المؤيّنة، واستخدام المحدّد متعدّد الوريقات لتوجيه الحزمة، والتحكّم بشدّتها، بهدف تركيز فعاليتها في مكان توضّع الورم، وتخفيف آثارها على النسج السليمة المجاورة له.

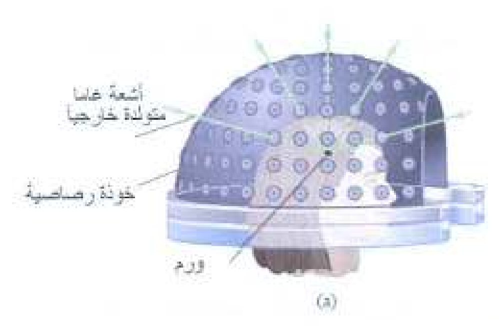


الشكل 13.9: المسرع الخطي وحزمة الأشعة السينية المستخدمة في معالجة المريض

تتضمّن المعالجة الإشعاعية عن بعد التقنية المعروفة باسم المعالجة الإشعاعية المطابقة ثلاثية البعد 3D-CRT (3D Conformal radiation therapy)، وفيها يتم تحديد تفاصيل الورم المعالج بأبعاده الثلاثة بشكلٍ دقيق، ممّا يسمح بإعطاء جرعة إشعاعية عالية دون خطر إيذاء الخلايا المجاورة له، وكذلك تخفيف الآثار الجانبية المزعجة للمعالجة الإشعاعية. وحديثاً انتشر استخدام المعالجة الإشعاعية معدّلة الشدة (Intensity Modulated Radiation Therapy)، التي تعتمد على تجزئة الحزمة الإشعاعية للمسرّع إلى حزم متعدّدة مختلفة الشدّة الإشعاعية، ممّا يمكّن الطبيب المعالج من زيادة الجرعة الإشعاعية للورم بهدف زيادة فرص الشفاء التام، وتخفيض كمية الأشعة التي تصل إلى النسج السليمة المجاورة. أثبت هذا النوع من المعالجة عن بعد أنّه أكثر أمناً من المعالجة 3D CRT، من ناحية حماية الخلايا أو النسج السليمة من الضرر الإشعاعي.

كما يتوافر نوع من المعالجة الإشعاعية عن بعد يُطلق عليها اسم Stereotactic Radiation Therapy، وهي تستخدم في حالات الأورام الصغيرة المحدودة في الرأس مثلاً، وفيها يتم إعطاء المريض جرعة إشعاعية عالية جداً في الموضع الدقيق للورم، ممّا يسمح بإتلاف الخلايا الورمية بشكلٍ كامل، دون آثار ضارة على النسج المحيطة به. تستخدم في هذه المعالجة لأورام الرأس خوذات ذات أشكال معقّدة (13.10a) تساعد على توجيه الحزمة الإشعاعية بشكلٍ دقيق، وحماية النسج المجاورة، كما تمنع المريض من أدنى حركة يمكن أن تؤدي إلى تغير في توجيه الحزمة الإشعاعية. ويعدّ مصدر الكوبالت60 الذي يصدر فوتونات غاما عالية الطاقة، من أهم المصادر المستخدمة لتدمير أورام الرأس باستخدام الجراحة الإشعاعية (Stereotactic Radio surgery)، ويكون النشاط الإشعاعي للمصدر المستخدم نحو 30 Curie، ويُطلق على الجهاز اسم Gamma Knife، أو المشرط الغاماوي (الشكل13.10b).

13.5.2. المعالجة عن قرب



الشكل13.10a. شكل تخطيطي للخوذة الرصاصية المستخدمة في الجراحة الشعاعية بالمشرط الغاماوي.



الشكل13.10b. المعالجة الإشعاعية: المشرط الغاماوي.

يعطى المريض في المعالجة عن قرب Internal radiation therapy الجرعة الإشعاعية إما عن طريق الفم وإمَّا عن طريق الحقن الوريدي، على شكل صيدلانيّات إشعاعيّة مناسبة للعضو المراد علاجه (الشكل13.11). تُصدر هذه المواد إشعاعات مؤينة تقطع مسافة قصيرة في مكان إصدارها مما يساعد على تخفيف الأعراض الجانبية والأذية التي يمكن أن تلحق بالأعضاء أو البنى المجاورة للعضو المعالج. ومن أهم المصادر المشعة المستخدمة في الطب النووي العلاجي: ^{131}I، ^{90}Yt، ^{153}Sm، ^{89}Sr.

فمثلاً لدى معالجة أمراض الغدّة الدرقية باليود المشع، يبتلع المريض المادة الدوائية Sodium Iodide، التي يمتصها الدم وتتركّز أخيراً في الغدّة، وعندها يبدأ اليود 131 بتدمير الخلايا المريضة فيها.



الشكل13.11a. المعالجة الإشعاعية باليود 131 للغدة الدرقية.

ويلجأ الأطباء أحياناً إلى وضع المادة المشعّة في الورم، أو في النسيج المحيط به، ويُطلق على هذه الطريقة في المعالجة اسم Brachytherapy، وهنا تتم زراعة كبسولات (بذور) المادة المشعة في النسيج المصاب بواسطة إبر أو حاقنات خاصة، بهدف زيادة فعالية الأشعة الصادرة في تدمير الخلايا الخبيثة. من أهم النظائر المشعّة المستخدمة في المعالجة عن قرب ^{137}Cs، ^{60}Co، ^{192}Ir، ^{125}I، ^{103}Pd، ويعتمد الأطباء هذه المعالجة بشكلٍ منفرد، في حالات مختلفة من الأورام كسرطانات البروستات، والمثانة، وعنق الرحم، والثدي، وغيرها، وفي بعض الحالات تستخدم مع المعالجة الكيميائية.



الشكل13.11b. بذور المادة المشعة المعدّة للزرع في البروستات لمعالجة سرطان البروستات.

13.6. وحدات الإشعاع وآثاره البيولوجية

13.6.1. التعرض _ الرونتجن ingested

التعرض Exposure مقدار يعبر عن التأين الذي

تحدثه الأشعة السينية x أو الأشعة الغاماوية γ في الهواء ويقدّر **بالرونتجن** (ورمزه R) الذي يقابل إحداث 1.61×10^{15} زوجاً من الإيونات في كل كيلوغرام من الهواء الجاف (في الشرطين النظاميين) تحمل شحنة كهربائية قدرها 2.58×10^{-4} كولوناً. أي إن الرونتجن يسبب تأين 4×10^{-9} % فقط من ذرات الهواء.

تقدر الطاقة الوسطية اللازمة لإحداث زوج إيوني في الهواء بنحو: 5.4×10^{-18} جولاً، ولهذا يقدر امتصاص الطاقة في الهواء المقابل لتعرض قدره $1R$ بنحو:

$$1.61\times10^{15}\times5.4\times10^{-18}=8.69\times10^{-3}J/kg$$

أي 0.00869 جولاً لكل كيلوغرام في الهواء.

وعلى الرغم من أن الرونتجن ما تزال تستعمل بصفة محدودة فهي ليست بالوحدة الإشعاعية الملائمة: إذ لا يجوز تطبيقها إلاّ على الأشعة السينية والغاماوية وآثارها في الهواء. إذْ إن النسج البشرية هي الوسط الذي يهمنا عادة، وتوضّع الطاقة فيها غالباً أعلى منه في الهواء. ففي حالة أشعة غاما ذات الطاقات المصادفة عادة $(0.1-2MeV)$ يقدر توضع الطاقة في النسيج، الموافق لتعرض قدره ($1R$) بنحو $9.6\times10^{-3}J/kg$. ولقد تم إدخال مفهوم الجرعة الممتصة من الإشعاع للتغلب على هذه الصعوبات.

13.6.2. جرعة الإشعاع الممتصة– الغري والراد

الجرعة الممتصة Absorbed Dose هي مقياس لتوضع الطاقة في أي وسط، الناجم عن أنواع الإشعاع المؤين كلّها. وقد كان يعبر عن الجرعة الممتصة بوحدة الراد Radiation Absorbed (RAD) Dose التي تعرف بأنها توضع للطاقة بمعدل $0.01J/kg$، ولكن منذ عام 1975 أدخلت وحدة جديدة للجرعة الممتصة وهي الغري $Gray(Gy)$ لتكون من وحدات الجملة الدولية وتعريفها:

$$1\,Gy=1\,J/kg=100\,rad$$

نستنتج مما سبق أن:

$1R$ يعطي جرعة ممتصة مقدارها في الهواء نحو $8.69\times10^{-3}/0.01=0.869\,rad$

ومقدارها في النسج البشرية:

$$9.6\times10^{-3}/0.01=0.96\,rad$$

ولذا يكون للتعرض مقدراً بالرونتجن، والجرعة الممتصة مقدرة بالراد في كثير من الأحيان القيمة نفسها تقريباً، ولنلاحظ أنه ينبغي دائماً ذكر الوسط الماص.

ومن الواضح أن تعرضاً قدره $1R$، يكافئ جرعة ممتصة في الهواء قدرها $8.69\,mGy$.

أما المعدل الزمني للجرعة (أو معدل الجرعة اختصاراً) فيساوي ناتج قسمة الجرعة الممتصة على زمن امتصاصها. ويقدر هذا المعدل بـ غري/ سنة، أو ميلي غري/أسبوع أو راد/ساعة أو راد/ سنة.

13.6.3. الجرعة المكافئة_ السيفرت والريم

على الرغم من أن الغري (أو الراد) وحدة فيزيائية كبيرة الفائدة، فقد تبين أن جرعة ممتصة معينة من أنواع الإشعاع المختلفة لا تحدث بالضرورة الضرر في الجمل الحيوية. فقد وجد مثلاً أن راداً من إشعاع ألفا يمكن أن يحدث الضرر البيولوجي الذي يحدثه 20 راداً من إشعاع غاما. إذ يجب أخذ فارق الفعالية البيولوجية الإشعاعية في الحسبان لدى جمع الجرعات الناجمة عن إشعاعات مختلفة للحصول على الجرعة الفعالة البيولوجية الكلية. ويكفي لهذا أن نضرب الجرعة الممتصة، من كل نوع من الإشعاع، بعامل النوعية Q الذي يعكس قدرة نوع معين من الإشعاع على إحداث الضرر والأذى (الجدول13.1). ويسمى الجداء المذكور الجرعة المكافئة وكان يعبر عنها بالريم Rad Equivalent for Man Rem حيث:

الجدول13.1. عامل النوعية

نوع الإشعاع	عامل النوعية Q
الأشعة السينية وغاما وبيتا	1
نترونات حرارية	2.3
نترونات سريعة وبروتونات	10
جسيمات ألفا	20

الجرعة المكافئة (رَيْم) = الجرعة الممتصة (الراد) × عامل النوعية Q

ولكن منذ عام 1979 أدخلت وحدة جديدة للجرعة المكافئة وهي السيفرت Sievert Sv، لتكون من واحدات الجملة الدولية وتعريفها:

$$1\,Sv = 1\,Gy \times Q = 100\,rad \times Q = 100\,rem$$

وقد تبين أن قيمة عامل النوعية تتوقف على كثافة التأين الذي يسببه الإشعاع، فمثلاً يولد جسيم ألفا نحو عشرة ملايين زوج من الإيونات في كل سنتمتر من الأنسجة، بينما يولد جسيم بيتا نحو خمسمئة ألف زوج في السنتمتر. ويسبب إشعاع غاما تأيناً كثافته مماثلة لتلك الناجمة عن إشعاع بيتا. وبما أن أنواع الإشعاع الأخرى كافة تقارن بأشعة غاما، فقد اتخذ عامل النوعية Q لإشعاع غاما مساوياً الواحد ومثل ذلك لأشعة بيتا. وعلى هذا يكون عامل النوعية لأشعة ألفا مساوياً 20. أما Q للنترونات فيتوقف على طاقتها وتؤخذ عادة القيمة 2.3 في حالة النترونات الحرارية. وتؤخذ القيمة 10 للنترونات السريعة $En \approx 1\,MeV$. يلخص الجدول الآتي قيم عامل النوعية Q.

مثال. تلقّى عامل في سنة الجرعات الآتية:

أشعة غاما	γ	$0.02\ Gy\ (2\ rad)$
نترونات حرارية	N_s	$0.005\ Gy\ (0.5\ rad)$
نترونات سريعة	N_f	$0.001\ Gy\ (0.1\ rad)$

ما الجرعة الكلية التي تلقاها؟

نقول: الجرعة المكافئة = الجرعة الممتصة × عامل النوعية

فيكون:

جرعة غاما المكافئة $0.02 \times 1 = 0.02\ Sv\ (2.0\ rem)$

جرعة N_s المكافئة $0.005 \times 2.3 = 0.0115\ Sv\ (1.15\ rem)$

جرعة N_f المكافئة $0.001 \times 10 = 0.01\ Sv\ (1.0\ rem)$

الجرعة المكافئة الكلية $= 0.0415\ Sv\ (4.15\ rem)$

13.6.4. أخطار الإشعاع

تخرب الطاقة الممتصة من الإشعاع المؤيِّن، لدى مروره عبر المادة، الوسط بإحداث تغيرات جزيئية أو تغيير في البنية البلورية. ويتعلق مقدار التخريب الناتج بطبيعة المادة الماصة وطاقة الإشعاع وشدته. وتكون الآثار عظيمة في الجزيئات العضوية المعقدة. ولهذا فإن الإشعاعات مضرة بالنسج الحية. ويتوقف مقدار التخريب الحادث فيها على الجرعة ومعدل الجرعة. ويجب عند النظر في أخطار الإشعاع على العضوية الحية التمييز بين نوعين من الأضرار:

الأضرار المرضية: وهي تؤدي إلى الموت إذا كانت شدتها كافية.

الأضرار الوراثية: فالضرر الذي يصيب الأعضاء التناسلية قد لا يؤثر في الجسم نفسه، لكنه يضر الأجيال القادمة. فالتشعيع المتواصل لسائر السكان، ولو كان ضعيفاً، يمكن أن يؤدي إلى انقراضهم في المستقبل ويمكن لجرعة (خلال أي فترة زمنية) قدرها $1\ mSv = 100\ m\ rem$، أي جرعة سنوية قدرها $50\ mSv = 5\ rem$ يجب ألّا تسبب ضرراً، إلاّ أن هذا يبدو غير صحيح تماماً: فالإحصاءات الأمريكية تشير إلى أن متوسط عمر المتخصصين في الأشعة أقصر بخمس سنوات من الأطباء الآخرين على الرغم من اتخاذهم جميع الإجراءات الممكنة لتخفيض الجرعات التي تتلقاها أجسامهم.

هذا وإن آثار الإشعاع في الأعضاء التناسلية أخطر بكثير لأن هذه الآثار تراكمية، بمعنى أن جرعة معينة تحدث الضرر نفسه سواء أخذت دفعة واحدة أم وزّعت على عدة سنين. وعندما يمر الإشعاع عبر الخلايا الجنسية فإنه يؤثر في صبغيات (كروموزومات) نواة الخلية محدثاً تغيرات يمكن أن تتجلى على شكل طفرات (تغيرات فجائية) في الذُّرية. وتكاد تكون هذه الطفرات كلها مؤذية.

إننا جميعاً نتعرض في الأحول العادية إلى طفرات طبيعية تعود إلى حد كبير إلى الحركة الاهتزازية لجزيئات أجسامنا وإلى النشاط الإشعاعي الطبيعي وإلى الأشعة الكونية. وتعد الجرعة الإجمالية من الإشعاع التي يتلقاها الإنسان منذ ولادته حتى سن الأربعين مساوية $44\ mSv = 4.4\ rem$. ويتضاعف هذا الرقم تقريباً إذا أضيفت إليه الجرعات الإضافية التي يتلقاها المرء عند طبيب الأسنان أو طبيب الأشعة. فالصورة الشعاعية تعادل جرعة موضعية تساوي $0.5 - 2\ mSv(0.05 - 0.2\ rem)$ والصورة الشعاعية السنية $40 - 50\ mSv(4 - 5\ rem)$.

ومع ذلك يسمح في حالات الطوارئ بأخذ جرعة لا تتجاوز $100\ mSv = 10\ rem$ لإنقاذ تجهيزات ثمينة، وجرعة لا تتجاوز $1\ Sv = 100\ rem$ إنقاذ حياة إنسان. ويقصد بهذين الرقمين تشعيع الجسم بكامله. أما إذا كانت الجرعة موضعية جداً لتخريب الورم الخبيث فتقع قيمتها في المجال $5 - 100Sv$.

لنذكر بهذه المناسبة أن الميناء المشع لساعة يد يعطي وحده $380\ mSv/\ year$ أي $38\ rem/\ year$، ولكن هذه الجرعة موضعية جداً.

ولنذكر أن دفاع الجسم البشري ضد إشعاع المواد النشيطة إشعاعياً أضعف من دفاعه ضد الإشعاعات الأخرى. إذ إن تلقي 600 ميكرو سيفرت أسبوعياً (60 ميلي ريم أسبوعياً) من الأشعة السينية مثلاً تحدث ضرراً للجسم الذي يتعرض لها برغم أنها تكافئ استطاعة قدرها 10^{-8} واطاً، بينما يستطيع الإنسان أن يتلقى دون خطر، بكامل جسمه وطول حياته، واطاً كاملاً من الإشعاع الشمسي. يبين الجدول 13.2 مدى الإشعاعات النووية في الهواء وفي الأنسجة الحية.

الجدول13.2. مدى الإشعاعات النووية في الهواء والأنسجة الحية

الإشعاع	المدى في الهواء	المدى في الأنسجة
ألفا	3 cm	0.04 mm
بيتا	300 cm	5 mm
السينية وغاما	كبير جداً	تعبر الجسم
نترونات بطيئة	كبير جداً	15 cm
نترونات سريعة	كبير جداً	تعبر الجسم

يتبين من هذا الجدول أن أشعة ألفا تمتص بسهولة كبيرة. ويكفي عادة لإيقافها صفيحة رقيقة من الورق، ولهذا فإن الوقاية من أشعة ألفا ليست مشكلة. أما أشعة بيتا فهي أشد نفوذاً من ألفا، وتتطلب الوقاية منها (فيما يخص الطاقات من $1 - 10MeV$) استخدام صفائح من اللدائن تصل ثخانتها إلى

$1\,cm$ كي تمتصها امتصاصاً تاماً. إن سهولة الوقاية من أشعة بيتا تعطي انطباعاً بأنها ليست خطرة خطورة أشعة غاما أو النترونات، ولهذا كثيراً ما تحمل منابع بيتا كبيرة ومكشوفة باليد مباشرة، وهذا عمل خطر جداً: فمعدل الجرعة الممتصة على مسافة $3\,mm$ من منبع بيتا نموذجي شدته* $37\,MBq = 1\,mCi$ هو تقريباً $30\,Gy/hour$ أي $300\,rad/hour$.

* البكريل هي واحدة التفكك الإشعاعي، وتعبر عن تفكك واحد في الثانية.

الفصل الرابع عشر

حالات المادة وميكانيك السوائل

Matter States &Liquids Mechanics

نتناول في هذا الفصل دراسة خواص المادة في حالتها المستقرة التي تعدّ حجر الأساس عند الانتقال إلى دراسة الأمواج الميكانيكية. إذ نؤكد أن الأمواج هي اضطرابات زمنية ومكانية لمركبات المادة، فيبرز هنا تأثير المكوّنات المجاورة في المكوّن المدروس ومدى التآثر بينها وعلاقتها بحالات المادة المألوفة.

14.1. حالات المادة

تصنف المادة العادية عادة وفق ثلاثة أطوار : الصلب والسائل والغازي. تسعى الأجسام الصلبة للمحافظة على أشكالها. الكثير من الأجسام الصلبة قاسيةً ؛ لا تتشوه بسهولة بالقوى الخارجية؛ لأن القوى العائدة للذرات المجاورة تبقي كل ذرة في موضع محدد. على الرغم من أن الذرات تهتز حول مواقع توازن ثابتة، فليس لديها طاقة كافية لتحطيم الروابط مع جاراتها. ولحني قضيب من الحديد، مثلاً، يجب تغيير ترتيب الذرات، الذي ليس من السهل عمله. يقوم الحداد بتسخين الحديد في كير ليحل الروابط بين الذرات بحيث يمكن أن يحني المعدن وفق الشكل المرغوب.

خلافاً للأجسام الصلبة، لا تحتفظ ذرات أو جزيئات السوائل والغازات بأماكن معينة، بل يمكن أن توجد في أية نقطة من حجم السائل أو من الوعاء الحاوي على الغاز ؛ نظراً لتمتعها بهذه الخاصة تجمل أحياناً تحت اسم موائع.

14.1.1. عوامل مرونة الجسم

توصف خصائص المرونة لمادة باستخدام مفهومي الإجهاد Stress والانفعال Strain. الإجهاد هو القوة المطبقة على واحدة السطح، تحدِث هذه القوة تشوُهاً في الجسم، وعندما تكون القوة عمودية على السطح يكون الإجهاد طولانياً (ضغطي أو شدّي)، أما إذا كانت القوة موازية للسطح فالإجهاد قصّي أو عرضاني، وفي الحالة العامة يمكن لجسم صلب فقط أن يتحمل قوة مائلة على سطحه فيكون له مركبات طولانية وقصية. وتشوُه جسم هو تغير يطرأ على أبعاده أو شكله لدى خضوعه لإجهاد. والانفعال مقياس لدرجة التشوُه، ويعبر عن ثابت التناسب بعامل المرونة Elastic modulus.

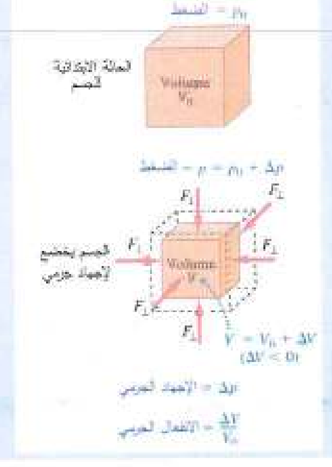
$$\text{Elastic modulus} = \frac{stress}{strain}$$

يوجد ثلاثة أنواع رئيسية لتشوّه جسم صلب توصف بالتالي:

1) **في النوع الأول: الاستطالة أو الانضغاط** وتمثل قيمته مقاومة الجسم للحمولة، ويعبر عنها بعامل يانغ Young's modulus Y. يكون الإجهاد في هذه الحالة عمودياً على السطح، ووحدته $Newton/m^2$، في حين أن الانفعال هو التغير النسبي في الطول زيادة أو نقصاناً وليس له واحدة، ويلاحظ إهمال التغير في أبعاد الجسم الأخرى، انظر الجدول (14.1) والأشكال فيه.

الجدول14.1. خصائص المرونة وأنواع الإجهاد والانفعال في تعريف عوامل المرونة

التشوّه حجمي	التشوّه قصّي	التشوّه تمددي أو انضغاطي
الإجهاد: تغير الضغط ΔP أو الضغط الصوتي $p_{acoustic}$	الإجهاد: قوة القص مقسومة على المساحة الموازية للسطح الذي تؤثر فيه $F_{\parallel} / A$	الإجهاد: القوة في وحدة مساحة المقطع $F_{\perp} / A$
الانفعال: التغير النسبي في الحجم أو الكتلة الحجمية $-\Delta V / V_0 = \Delta\rho / \rho_i$	الانفعال: نسبة الإزاحة النسبية لـ x إلى الفاصل h بين السطحين المتوازيين $.x / h$	الانفعال: التغير النسبي في الطول $\Delta l / l_0$
ثابت التناسب: العامل الجرمي (أو عامل المرونة الحجمي) B	ثابت التناسب: عامل القص S	ثابت التناسب: عامل يانغ Y



2) وفي النوع الثاني الالتواء أو الفتل وتمثل قيمته مقاومة الجسم لحركة المستويات الداخلية فيه التي ينزلق بعضها فوق بعض، ويعبر عنه بعامل القص Shear Modulus S؛ ويكون الإجهاد في هذه الحالة موازياً للسطح، في حين يعرّف الانفعال بأنه نسبة الإزاحة النسبية بين سطحين في الجسم إلى الفاصل بينهما، وقد يعبر عنها بزاوية فتل، الجدول14.1. يمكن أن يُجْمَلَ التشوهان بالقول: إنه إذا كان الجسم الصلب قبل تطبيق القوة مكعباً، فستقود الإجهادات الناظمية إلى تغيير أطوال أضلاعه فيصبح متوازي مستطيلات أولاً،

وإذا وجدت إجهادات مماسية فسيصبح متوازي المستطيلات متوازيَ سطوح كل منها متوازي أضلاع.

3) وفي النوع الثالث **تغير الحجم النسبي** وتمثل قيمته مقاومة الجسم (سواء كان صلباً أم مائعاً) لتغير حجمه ويعبر عنه بعامل المرونة الحجمي Bulk modulus B. يكون الإجهاد في هذه الحالة مطبقاً من جميع الجهات، ويمثله تغير الضغط الذي يؤثر في الجسم. يلاحظ في هذا النوع وجوب خضوع كامل الجسم للإجهاد نفسه في أي نقطة منه، وهذا محقق عادة في الموائع عبر تغير حجم الوعاء الذي يحويها، أما في الأجسام الصلبة فيجب أن تكون مغمورة في المائع بالكامل حتى يتحقق ذلك، إذ ينقل المائع تغيرات الضغط بأمانة في جميع الاتجاهات. وفي حالة الأمواج الصوتية، يكون هذا التغير في الضغط هو الضغط الصوتي الذي يميز الموجة الصوتية، الجدول 14.1.

14.1.2. لدونة الجسم

توصف الثوابت السابقة بالمرونة لأنه عندما تزال القوى التي تحدث التشوُّه عن جسم مرن، يعود هذا الأخير تبعاً لقانون هوك إلى أبعاده وشكله الأصليين. ينص قانون هوك بشكله المعمم على أن تشوُّه مادة (مقيساً بالانفعال) يتناسب طردياً مع القوى التي تحدث التشوُّه (مقيسة بالإجهاد). يعطي الجدول14.1 تعريفاً لكل من الإجهاد والانفعال في الحالات التي يكون فيها التشوُّه تمددياً أو انضغاطياً في العمود الأول وقصّياً في العمود الثاني، وحجمياً في العمود الثالث.

يصح هذا الوصف في مجال معين من الإجهادات والانفعالات المقابلة لها، لكنه إذا تم تجاوز حدود هذا المجال لا يعود الجسم إلى أبعاده الأصلية ولا إلى شكله الأصلي فيوصف بأنه في المجال اللدن، ولا تعود العلاقة خطية بين الإجهاد والانفعال، أي تصبح لا خطية.

يمكن لقوة مطبقة مماسية على مائع أن تجعله يجري بسهولة. على سبيل المثال، يؤدي انقباض العضلة القلبية إلى تطبيق قوة على الدم فتضخه ويجري في الأوعية الدموية في الجسم. غير أن هذا الانقباض لا يغير حجم الدم كثيراً في حالة السوائل. ويمكن في كثير من الحالات أن نقول إن السوائل غير قابلة للانضغاط. وبما أن السوائل لا تقاوم تغيير الشكل عند تطبيق الإجهاد المماسي وإنما تقاوم الجريان في هذه الحالة، فيعبر عن ذلك بعامل اللزوجة (راجع الفقرة 14.3.5)، في حين أنها تقاوم الإجهاد الناظمي عندما توجد في إناء مغلق، لذلك يستعمل الضغط الذي هو القوة المطبقة ناظمية على واحدة السطح من السائل ويكون الانفعال المقابل تغير حجم السائل. وتتشابه السوائل مع الغازات في هذه الناحية.

إن تعاريف عوامل المرونة الواردة أعلاه هي تعاريف توازنية من وجهة نظر الميكانيك، فيفترض فيها عدم حركة الجسم، خلافاً لعامل اللزوجة المرتبط بالحركة التي هي انزلاق في هذه الحالة. وقد يكون البدء

بدراسة السوائل توازنياً ثم دراسة حركتها أسهل. وسيكون ذلك مقدمة لدراسة الأمواج في الموائع وفي الأجسام الصلبة التي سنتناولها في فصل مستقل.

14.2. توازن السوائل

للسوائل أهمية كبيرة في الحيوية، ولاسيَّما في الدورة الدموية التي تمثل حركة نقل بالحمْل convection للدم في الأوعية الدموية، نتيجة الضغط الذي تطبقه العضلة القلبية على الدم، وما النبض إلاّ موجة لذلك الضغط. ويجدر بالذكر أن كلاً من ضغط الدم الشرياني والنبض مؤشر سريري على صحة الجسم أو اعتلاله. ولهذا كانت الغاية من هذا الفصل دراسة القوانين التي تتحكم في تدفق الدم من القلب ثم الأبهر إلى أعضاء الجسم المختلفة عن طريق الشرايين والشعيرات الدموية، كمعادلة الاستمرارية التي تربط بين سرعة التدفق في وعاء دموي ومساحة مقطعه، ومعادلة برنولي التي تربط بين الضغط وسرعة التدفق والارتفاع في نقطتين من وعاء دموي. وبذلك يمكن الكشف عن الخلل في النظام الوعائي وتفسير بعض الأمراض الناجمة كنوبة نقص التروية العابرة والتضيق الوعائي وتوسعه. ندرس أيضاً قاعدة أرخميدس وعلاقة الوزن النوعي بتحليل الدم أو البول. ندرس أيضاً قانون بوازوي الذي يربط بين معدل الجريان الحجمي في وعاء دموي من جهة وفارق الضغط بين طرفي الوعاء ونصف قطره الداخلي وطوله ولزوجة الدم، وتطبيقها في الانسداد الشرياني وقياس سرعة التثفل. يضم هذا الفصل أيضاً دراسة للتوتر السطحي الذي يفسر حمل النبات للماء من الجذور إلى الأوراق وآلية التنفس في الرئتين.

تشترك السوائل والغازات، كما نوهنا، ببعض الصفات لكنها تختلف في صفات أخرى، فالسوائل تأخذ شكل أسفل الوعاء الذي يحويها ولها حجم خاص بها، أما الغازات فتشغل جزيئاتها كامل أرجاء الوعاء المغلق الذي يحويها. وكذلك تختلف السوائل عن الغازات بوجود بنية منتظمة على أبعاد قصيرة متمثلة بعدد الجوار الوسطي الذي يقارب عدد الجوار الوسطي في حالة الجسم الصلب. وإن قوى الترابط بين الجزيئية، ولاسيَّما قوى فاندرفالس التي تتناسب طردياً مع مقلوب القوة السادسة للبعد $1/r^6$، لم تعد مهملة: فهي بالتالي صعبة الانضغاط أو التمدد وتملك حجماً معيناً. وقد أكدت تجارب انعراج الأشعة السينية في السوائل هذه البنية. كما تنشأ نتيجة لوجود مثل هذه القوى الخصائص الرئيسية للسوائل كالتوتر السطحي في حالة التوازن السكوني والاختلاف الكبير في عامل اللزوجة في حالة الحركة.

14.2.1. الضغط

يعدّ الضغط الذي نقيسه أو نشعر به متحولاً جهرياً، وأصله من وجهة نظر مجهرية ناتج عن تصادمات بأنواعها المختلفة.



الشكل14.1. القوى العائدة للمائع الساكن تؤثر في الوعاء وفي الجسم الغاطس فيه

المنشأ المجهري للضغط. المائع الساكن، من وجهة نظر جهرية، ساكن في كل نقاطه ومِنْ ثَمَّ فإن مجموع القوى المؤثرة في هذه النقطة أينما كانت معدوم. غير أن الذرات أو الجزيئات في مائع ساكن ليست في حالة سكون على المستوى المجهري؛ فهي تتحرك وتتصادم فيما بينها باستمرار. ولا بدّ عند تغير اندفاعاتها من وجود قوى مقابلة.

تعريف الضغط. المائع الساكن يطبق قوة على أي سطح على تماس معه؛ اتجاه القوة عمودي على السطح (الشكل14.1). والمائع السكوني لا يمكنه تطبيق قوة موازية للسطح. إذ إن تطبيق قوة موازية للسطح يستدعي وفقاً لقانون نيوتن الثالث أن يطبق السطح قوة معاكسة على السائل فيحركه خلافاً لفكرة أن السائل ساكن.

الضغط الوسطي لمائع على نقاط تقع في سطح مستوٍ يساوي

$$P_{av} = \frac{F}{A} \qquad (14.1)$$

حيث F قيمة القوة التي تؤثر عمودياً في السطح و A مساحة السطح الذي تؤثر فيه القوة. بتخيل سطح دقيق عند مختلف النقاط في المائع وقياس القوة التي تؤثر فيه يمكن تعريف الضغط في أي نقطة من المائع. يكون الضغط عند حد السطوح الصغيرة هو ضغط المائع.

وحدة الضغط في جملة الواحدات الدولية N/m^2 وتدعى الباسكال Pa. غير أنه يشيع استخدام واحدة أخرى هي وحدة الجو atmosphere (atm). والجو الواحد ضغط الهواء الوسطي عند سطح البحر. وعامل التحويل بين الجو والباسكال

$$1atm = 101.3kPa$$

مثال14.1. الضغط الناجم عن الأحذية العالية الكعب

شابة تزن 534N (120lb) تمشي نحو غرفة النوم وهي ترتدي حذاء التنس. ثم ارتدت حذاء سهرة عالي الكعب. كانت مساحة مقطع حذاء التنس $60cm^2$ ومساحة مقطع كعب حذاء السهرة $1cm^2$. أوجد من أجل كل زوج من الأحذية الضغط الوسطي الذي يحدثه الكعب الذي يكون على تماس مع الأرض عندما يكون كامل وزنها محمولاً على كعب واحد.



فكرة الحل. إن الضغط الوسطي هو القوة المطبقة على الأرض مقسومة على مساحة التماس. القوة التي يطبقها الكعب على الأرض 534N. مع الإبقاء على الوحدات متجانسة في الجملة الدولية، نحوّل المساحات من السنتمترات المربعة إلى الأمتار المربعة.

الحل. الضغط الوسطي هو وزن المرأة مقسوماً على مساحة مقطع الكعب. في حالة حذاء التنس:

$$P=\frac{F}{A}=\frac{534\ \mathrm{N}}{6.00\times10^{-3}\ \mathrm{m}^2}=8.90\times10^{4}\ \mathrm{N/m^2}=89.0\ \mathrm{kPa}$$

وفي حالة حذاء السهرة:

$$P_{av}=\frac{F}{A}\ P=\frac{534\ \mathrm{N}}{1.00\times10^{-4}\ \mathrm{m}^2}=5.34\times10^{6}\ \mathrm{N/m^2}=5.34\ \mathrm{MPa}$$

مناقشة. يقدر هذان الضغطان بواحدة الجو على النحو 0.879 و52.7 على الترتيب. ويلاحظ أن الضغط الذي يطبقه حذاء السهرة أكبر 60 مرة من الضغط الذي يطبقه حذاء التنس؛ لأن القوة نفسها توزعت على 1/60 من المساحة!

الضغط الجوي

نعيش على سطح الأرض في قاع محيط من الهواء لكنه ليس متجانس الكثافة، إذ تختلف باختلاف الارتفاع. والقوى التي يطبقها الهواء على أجسامنا وعلى سطوح الأجسام الأخرى كبيرة جدا نسبياً: إذ إن القوة المطبقة على واحدة المساحة تقابل 1atm ويساوي نحو $10\ \mathrm{N/cm^2}$ من مساحة السطح، أو نحو $15\mathrm{lb/inch^2}$. ونحن لا نتحطم بهذا الضغط؛ لأن ضغط معظم الموائع في أجسامنا يساوي تقريباً ضغط الهواء الذي يحيط بنا. وبالتشابه، لنعتبر كيساً مغلقاً من رقائق البطاطا. ونسأل لماذا لا يتحطم الكيس بالهواء الذي يدفعه من كل الجوانب؟ لأن ضغط الهواء في الكيس له القيمة نفسها ويدفع الجوانب كلها نحو الخارج. إن ضغط الموائع في خلايانا توافق ضغط الموائع التي تحيط بنا والتي تندفع نحو أغشية خلايانا، ومِنْ ثَمَّ لا تتمزق الأغشية.

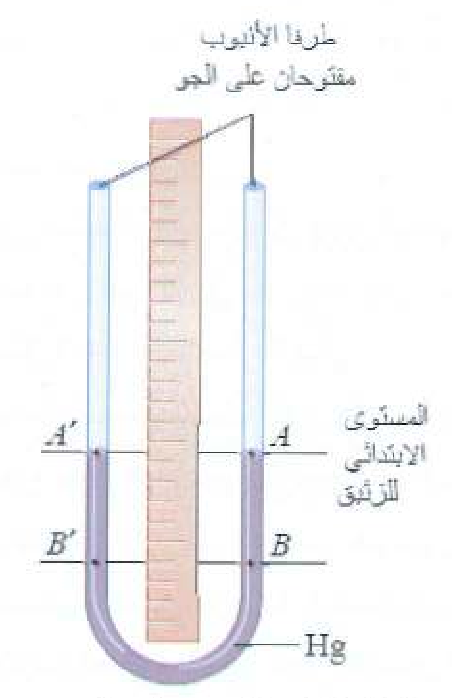
بالمقابل إن ضغط الدم في الشرايين أعلى بنحو 20kPa من الضغط الجوي. وتتمدد stretched جدر الشرايين المرنة القوية بضغط الدم داخلها؛ ويعاكس توترها السطحي هذا الضغط فتحافظ الجدر على قيمته، وتمنع انتقاله إلى مواقع الدم الأخرى في الجسم.

14.2.2. قياس الضغط

تستخدم واحدات أخرى للضغط بالإضافة إلى الجو والباسكال. ففي الولايات المتحدة يقاس الضغط في إطار السيارة بالباوند لكل بوصة مربعة. بينما تسجل مكاتب الطقس Weather bureaus الضغط الجوي بالبار bar أو الملي بار millibar. وتعطي تقارير الطقس التلفزيونية والبارومترات المنزلية الضغط بالبوصات أو الملمترات الزئبقية. إذ الجو الواحد يساوي نحو بار واحد (1000millibars)، أو 76cm زئبقي أو 29.9 in زئبقية. يقاس ضغط الدم وهو الفارق بين الضغط في الدم والضغط الجوي بالملمتر الزئبقي (mmHg) الذي يدعى أيضاً التور Torr. لبعض هذه الوحدات أسباب تاريخية تتعلق بمقاييس الضغط التي كانت تستعمل مثل المانومانر والبارومتر.

14.2.3. المانومتر ومقاييس الضغط

يتكون المانومتر الزئبقي manometer من أنبوب شاقولي على شكل الحرف U، يحوي بعض الزئبق، وأحد طرفيه مفتوح على الجو والآخر موصول إلى وعاء يحوي غازاً نريد قياس ضغطه مثلاً. يبين الشكل14.2 المانومتر قبل أن يوصل إلى مثل هذا الوعاء. عندما يكون طرفا المانومتر مفتوحين على الجو، يكون لمستويي الزئبق الارتفاع نفسه.



الشكل14.2. مانومتر زئبقي مفتوح من الجانبين. النقطتان A و 'A كلتاهما عند الضغط الجوي نفسه.

وإذا وصل بالون منفوخ إلى الجانب الأيسر من الأنبوب U (الشكل14.3). وكان ضغط الغاز في البالون أعلى من الجو، فإن الغاز يدفع الزئبق نحو الأسفل في الجانب الأيسر، ويرغمه على الصعود في الجانب الأيمن.

لانخفاض كثافة الغاز مقارنة بكثافة الزئبق، يفترض أن ضغط الغاز في أي نقطة منه لها القيمة نفسها مهما يكن عمقها. ففي النقطة B يدفع الزئبق الغاز بالقوة نفسها التي يدفع الغاز بها الزئبق، ومِنْ ثَمَّ فإن للضغط عند النقطة B القيمة نفسها لضغط الغاز.

وعندما كانت النقطة 'B عند الارتفاع نفسه للزئبق في النقطة B، كان الضغط في النقطة 'B هو نفسه في B. أما النقطة C فضغطها هو الضغط الجوي.

الضغط عند النقطة B يساوي:

$$P_B = P_{B'} = P_C + \rho g d$$

حيث ρ كثافة الزئبق (كتلة واحدة الحجوم). ويكون فارق الضغط على جانبي المانومتر يساوي:

$$\Delta P = P_B - P_C = \rho g d \qquad (14.2)$$

ومِنْ ثَمَّ يعدّ الفارق بين مستويي الزئبق d مقياساً لفرق الضغط الذي يعبر عنه بالملمترات الزئبقية.

إن الضغط المقيس عندما يكون أحد جانبي المانومتر مفتوحاً هو الفارق بين الضغط الجوي وضغط الغاز وليس الضغط المطلق للغاز. يدعى هذا الفارق الضغط القياسي gauge pressure، لأنه يمثل ما يقيسه معظم المقاييس (وليس مجرد المانومترات).

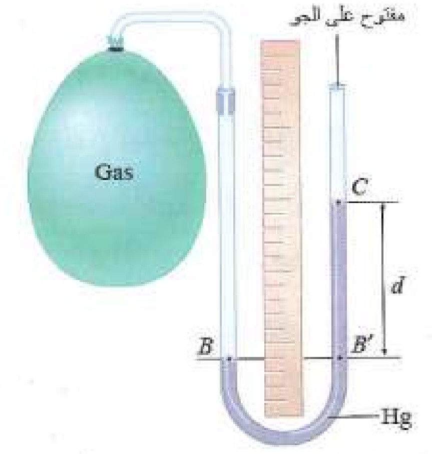
الضغط القياسي

$$P_{gauge} = P_{abs} - P_{atm} \qquad (14.3)$$

لما كانت كثافة الزئبق $13600\,kg/m^3$، فيمكن تحويل $1mm\text{Hg}$ إلى باسكال بتبديل $d = 1.00mm$ في المعادلة 14.2:

$$1.00\ \text{mm Hg} = \rho g d$$
$$= (13600\,\text{kg/m}^3)\times(9.80\text{m/s}^2)(0.00100\,\text{m}) = 133\,\text{Pa}$$

أي إنه يساوي133 باسكال. يمكن استعمال سائل في المانومتر غير الزئبق، كالماء أو الزيت. فتبقى المعادلة 14.2 سارية المفعول طالما أننا نستخدم كثافة السائل الصحيحة ρ في المانومتر.



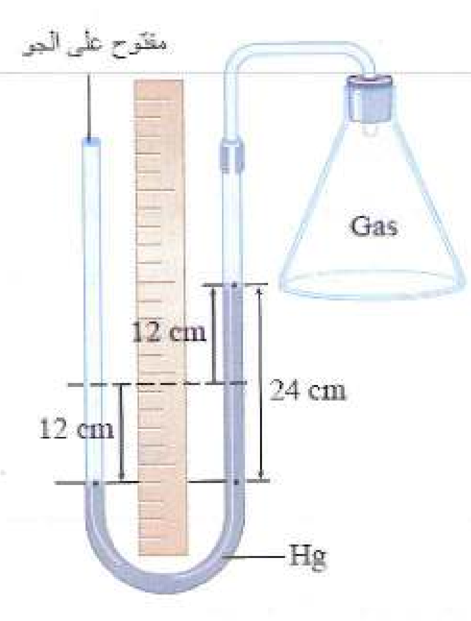
الشكل14.3. المانومتر موصول بأحد جانبي وعاء غازي بضغط أكبر من الضغط الجوي.

وإن استعمال الزيت يجعل فروق الضغط مقابلة لارتفاعات أكبر مما هي عليه للزئبق مما يجعل قياس الفرق أكثر دقة.

مثال14.2. المانومتر الزئبقي

يوصل مانومتر بوعاء غازي لقياس ضغطه. قبل وصل الوعاء كان طرفا المانومتر مفتوحين على الجو. بعد وصل الوعاء يرتفع الزئبق عند الطرف الموصول بالغاز 12cm فوق المستوى السابق. (a) ما الضغط القياسي للغاز بالباسكال؟ (b) ما الضغط المطلق للغاز بالباسكال؟

الفكرة. يشير كون عمود الزئبق أعلى عند الطرف الموصول بالغاز، إلى أن ضغط الغاز المغلق أخفض من الضغط الجوي. ونحتاج لإيجاد الفرق في مستويي عمودي الزئبق على الجانبين. (تنبيه: هذا الفرق ليس 12cm!. فإذا ارتفع أحد الجانبين بمقدار 12cm، يكون الجانب الآخر قد هبط بمقدار 12cm، لأن الحجم الموجود في المانومتر هو نفسه).



الشكل14.4. عندما يربط وعاء غازي بأحد جانبي مقياس زئبقي، يهبط أحد الجانبين 12cm ويرتفع الجانب الآخر بالقدر نفسه.

الحل. (a) الفرق في مستويي الزئبق 24cm (الشكل14.4). نظراً لصعود الزئبق في الجانب الموصول بالغاز، يكون الضغط المطلق للغاز أخفض من الضغط الجوي. ومِنْ ثَمَّ فإن الضغط القياسي للغاز أقل من الصفر. ويكون الضغط القياسي بالباسكال

$$P_{gauge} = \rho g d$$

حيث العمق $d = -24cm$ (الزئبق أعلى بمقدار 24cm في جانب الغاز). ومِنْ ثَمَّ:

$$P_{\text{gauge}} = (13600\,\text{kg/m}^3)\times(9.80\,\text{m/s}^2)(-0.24\,\text{m}) = -32\,\text{Pa}$$

(b) الضغط المطلق للغاز

$$P = P_{\text{gauge}} + P_{\text{atm}}$$
$$= -32\ \text{kPa} + 101\ \text{kPa} = 69\ \text{kPa}$$

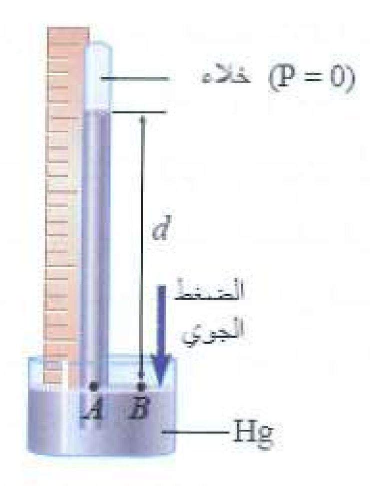
للتأكد يخبرنا المانومتر مباشرة أن الضغط القياسي للغاز يساوي 240 mmHg-. بالتحويل إلى باسكال

$$-240\ \text{mmHg}\times 133\text{Pa/mmHg} = -32\text{kPa}$$

تطبيق: ارتفاعا العمودين في المانومتر

يوصل مانومتر زئبقي بوعاء غازي. (a) ارتفاع عمود الزئبق في الجانب الموصول بالغاز 22.0cm (مقيساً من أسفل المانومتر). ما ارتفاع عمود الزئبق في الجانب المفتوح إذا وجد أن الضغط العياري لدى القياس 13.3 kPa؟ (b) إذا تضاعف الضغط القياسي للغاز فما الارتفاعان الجديدان في العمودين؟

14.2.4. البارومتر



الشكل14.5. بارومتر بسيط

يمكن أن يؤدي المانومتر دور البارومتر Barometer– وهو أداة قياس الضغط الجوي. غير أنه بدلاً من أن يوصل أحد طرفي المانومتر بوعاء فيه غاز، يوصل بوعاء ومضخة تخلية، لتضخ الهواء خارجه والحصول على ما هو أقرب ما يمكن من الخلاء – الضغط الصفري. يدفع الضغط الجوي في هذه الحالة المائع نحو الأسفل في أحد الجانبين ونحو الأعلى في الجانب الآخر باتجاه الوعاء المخلى.

يبين الشكل14.5 بارومتراً بسيطاً وهو أول مقاييس الضغط الجوي المستعملة؛ يتكون من أنبوب طوله يزيد على 76cm ومغلق من أحد طرفيه، وحوض ومسطرة. يملأ الأنبوب بالزئبق حتى نهاية الطرف المفتوح، ثم يقلب الأنبوب في حوض من الزئبق. يتدفق بعض الزئبق من الأنبوب إلى الوعاء. فيكون الحيز الباقي في أعلى الأنبوب المغلق خلاء تقريباً؛ لأنه لم يتبق فيه أي شيء عدا مقدار مهمل من بخار الزئبق. للنقطتين A و B المستوى نفسه للزئبق، ومِنْ ثَمَّ كلتاهما عند الضغط الجوي؛ لأن الوعاء مفتوح على الهواء. إن البعد d من A إلى أعلى عمود الزئبق في الأنبوب المغلق إذن قياس للضغط الجوي (غالباً ما يطلق عليه الضغط البارومتري لأنه يقاس ببارومتر، وقد كان توريشللي هو من ابتكر البارومتر وقد أطلق اسمه على واحدة المليمتر الزئبقي تخليداً لذكراه).

14.2.5. تطبيق على المانومتر: قياس ضغط الدم



الشكل14.6. استخدام مقياس ضغط الدم.

مقياس ضغط الدم. يقاس ضغط الدم بمقياس ضغط الدم sphygmomanometer (الشكل14.6). يتكون أقدم نوع لمقاييس الضغط من مانومتر زئبقي، يربط أحد جانبيه بحزام ضاغط (كيس مغلق- الحزام). يلف الحزام حول الذراع العلوية عند مستوى القلب، ثم يضخ فيه الهواء. يقيس المانومتر الضغط القياسي للهواء في الحزام. يكون الضغط في الحزام في بادئ الأمر أعلى من الضغط الانقباضي systolic، وهو الضغط الأعظمي في الشريان العضدي الذي يحدث لدى تقلص القلب. يؤدي الضغط في الحزام إلى عصر الشريان المغلق ولا يتدفق الدم في الساعد. ثم يفتح صمام في الحزام بحيث يسمح للهواء بالخروج ببطء. وعندما يهبط ضغط الحزام إلى أخفض من الضغط الانقباضي بقليل، تجري قبيل التضيق في الشريان نفثة squirt صغيرة من الدم، مع كل ضربة قلب. يمكن سماع صوت الجريان المضطرب للدم قبيل التضيق بسماعة صدر.

عندما يستمر الهواء بالانفلات من الحزام، يستمر صوت الدم الذي يجري في التضيق في الشريان بأن يسمع. وعندما يصل الضغط في الحزام إلى الضغط الانبساطيdiastolic pressure – أخفض ضغط يحدث يسمع عندما تسترخي العضلة القلبية– لم يعد يوجد تضيق في الشريان، ومِنْ ثَمّ تتوقف الأصوات النبضية pulsing sounds. يقدر الضغطان القياسيان لقلب سليم بنحو 120mmHg للانقباضي و80mmHg للانبساطي.

14.2.6. قوة الطفو



الشكل14.7. القوة المؤثرة في مكعب من الجليد الطافي. مكعب الجليد في حالة توازن ومِنْ ثَمّ $\vec{F}_B + m\vec{g} = 0$

هي قوة ناتجة عن قاعدة أرخميدس التي تنص على أن المائع يطبق على جسم مغمور فيه قوة محصلة تساوي وزن حجم الجسم V_o من المائع المزاح. وتستنتج هذه القاعدة بتحصيل قوى الضغط الظاهرة في الشكل (14.1) فتكون النتيجة F_B المبينة في الشكل (14.7) مثلاً. تسمى القوة المتجهة نحو الأعلى المقابلة قوة الطفو. أما إذا كان الجسم مغموساً وليس مغموراً كلياً نتيجة كون كثافة المائع أكبر من كثافة الجسم فسينغمس حجم من الجسم V_f وزنه يساوي وزن الجسم، ويتحقق التوازن بين القوة الصافية العائدة للثقالة والطفو وكذلك العلاقة:

$$\frac{V_f}{V_o} = \frac{\rho_o}{\rho_f} \qquad (14.4)$$

الوزن النوعي. تدعى نسبة كثافة مادة ما ρ إلى كثافة الماء ρ_{water} في الدرجة $4^{\circ}C$ الوزن النوعي Specific gravity. والوزن النوعي ليس له وحدات (وفق هذا التعريف خلافاً لما يشير إليه الاسم) لأنه نسبة كثافتين. وقد اختير الماء في الدرجة $4^{\circ}C$ كمادة مرجعية لأن كثافة الماء في هذه الدرجة تكون في قيمتها العظمى (في الضغط الجوي). وبناء عليه تكون كثافة ماء البحر $1.025\,gm/cm^3$ أو $1025\ kg/m^3$ (قد تختلف التسمية عند بعض المؤلفين، فتسمى النسبة المذكورة الكثافة النسبية، أما الوزن النوعي عندهم فهو وزن واحدة الحجوم).

$$S.G. = \frac{\rho}{\rho_{water}} = \frac{\rho}{1000\,kg/m^3} \quad \text{الوزن النوعي} \qquad (14.5)$$

14.2.7. تطبيقات الوزن النوعي في الطب

غالباً ما تتضمن اختبارات الدم تحديد الوزن النوعي للدم، وهو عادة نحو 1.040 إلى 1.065. إذ يمكن أن تدل القراءة الشديدة الانخفاض على فقر الدم، لأن وجود خلايا الدم الحمراء يزيد من الكثافة الوسطية للدم. يتم الاختبار قبل سحب الدم من المتطوع، فتوضع قطرة من الدم في محلول معلوم الكثافة. فإذا لم تغطس القطرة، ثمة خطورة على المتبرع بالدم؛ لأن تركيز خلايا الدم الحمراء منخفض جداً. يتضمن تحليل البول أيضاً قياساً للوزن النوعي (عادة من 1.015 إلى 1.030)؛ تدل القيمة العالية جداً على تركيز مرتفع غير طبيعي للأملاح المنحلة، الأمر الذي ينذر بمشكلة طبية.

14.3. جريان الموائع

أنواع جريان الموائع. يخضع تحريك الموائع لمعادلات مستمدة من قانون نيوتن في التحريك، لكنه مطبق على عنصر حجمي صغير. ولحل معادلة تحريكه يؤخذ في الحسبان تأثير القوى الخارجية فيه إضافة إلى تأثير العناصر المجاورة والقوى التي تطبقها على العنصر المدروس، ويأتي على رأسها الضغوط وتغيراتها، وبهذا يمكن أن تتغير كثافة العنصر المدروس ومِنْ ثَمَّ كتلته؛ مما يزيد في تعقيد الدراسة. لإيضاح بعض الأفكار المهمة في الحالات البسيطة، نقصر دراستنا أولاً على موائع خاصة تجري في شروط خاصة.

يمكن أن نفترض، على سبيل المثال، مائعاً غير قابل للانضغاط، فتؤخذ كثافته ثابتة عند الحركة. كذلك يمكن أن يوصف جريان المائع بأنه مستقر أو غير مستقر. ويكون الجريان مستقراً، عندما تكون سرعة المائع في أي نقطة منه ثابتة مع مرور الزمن. وهذه السرعة ليست بالضرورة نفسها في كل نقطة. أيضاً تحتاج الموائع المتحركة لأن يطبق قوة على سطحها الحرّ كي تحافظ على جريانها عبر طبقة ملتصقة بسطح تماسها مع وسيط القوة، وتنقل هذه الطبقة تأثيرها الحركي إلى الطبقات الأخرى عبر ما يعرف بقوة لزوجة المائع. إن قوة اللزوجة هذه تعاكس جريان المائع؛ وهي نظيرة قوة الاحتكاك الحركية بين الأجسام

الصلبة. ولا بد لقوة خارجية أن تعمل على مائع لزج (ومِنْ ثَمَّ أن تقوم بعمل) للإبقاء على الجريان. تدرس اللزوجة في الفقرة 14.3.5. لذلك يمكن للتبسيط الثاني أن ننظر في الموائع غير اللزجة – يجري المائع حيث تكون قوى اللزوجة من الصغر بحيث يمكن إهمالها. ونهمل مبدئياً القوى السطحية المتمثلة بالتوتر السطحي، الذي نقوم بدراسته في الفقرة 14.4.

أخيراً يمكن أن يكون الجريان مستقراً ورقائقياً laminar أو طبقياً. فيجري المائع في طبقات منتظمة neat وكأنها منفصلة بعضها عن بعض، بحيث إن كل جزء صغير من كل طبقة يتبع المسار نفسه كأي جزء آخر من هذه الطبقة. يدعى المسار الذي يسلكه المائع، بدءاً من أي نقطة، خط التيار (الشكل14.8). يمكن لخطوط التيار أن تنحني وتنثني، ولكنها لا يمكن أن تتقاطع فيما بينها؛ إذ يمكن أن تعرَّف خطوط التيار، كتعريف خطوط القوة، على أنها المنحنيات التي يمثل المماس في كل نقطة منها سرعة تلك النقطة. خطوط التيار طريقة ملائمة لوصف جريان مائع في مشهد معين؛ ولاسيَّما في الجريان الرقائقي، إذ إنها ستكون معقدة جداً في النوع الثاني من الجريان الاضطرابي أو الدوّامي.



الشكل14.8. نفق ريحي يبين خطوط التيار في جريان الريح أمام سيارة.

المائع المثالي. الحالة الخاصة التي ندرسها أولاً هي جريان المائع المثالي. فالمائع المثالي غير قابل للانضغاط ويخضع للجريان الرقائقي، وتغيب فيه اللزوجة. في بعض الشروط، يمكن نمذجة الموائع الحقيقية بأنها مثالية تقريباً، ولكن ليس في كل الشروط.

تتحكم قاعدتان بجريان المائع المثالي هما: معادلة الاستمرارية ومعادلة برنولي. ومعادلة الاستمرارية ليست إلّا تعبيراً عن انحفاظ الكتلة في مائع غير قابل للانضغاط: نظراً لعدم خلق أو تحطيم أي مائع، يجب أن تظل الكتلة الكلية للمائع ثابتة، مع افتراض عدم وجود منابع أو بالوعات خلال مساره. أما معادلة برنولي التي ندرسها في الفقرة 14.3.3 ليست إلّا شكلاً من أشكال قانون انحفاظ الطاقة المطبَّق على جريان الموائع. تمكننا هاتان المعادلتان معاً من التنبؤ بجريان مائع مثالي.

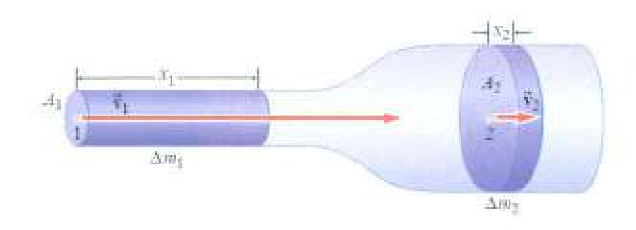
14.3.1. معادلة الاستمرارية

نبدأ باشتقاق معادلة الاستمرارية، التي تربط بين سرعة جريان مائع بمساحة المقطع. لنفرض مائعاً غير قابل للانضغاط يجري في أنبوب مساحة مقطعه غير متجانسة في شروط الجريان المستقر. يجري المائع

بالسرعة v_1 (إلى يسار الشكل14.9)، فيقطع المسافة

$$x_1 = v_1 \Delta t$$

خلال الفاصل الزمني Δt. فإذا كان A_1 مساحة مقطع هذا الجزء من الأنبوب، فإن كتلة الماء التي تتحرك أمام النقطة 1 خلال الزمن Δt تساوي



الشكل14.9. مائع غير قابل للانضغاط يجري أفقياً في أنبوب غير متجانس المقطع.

$$\Delta m_1 = \rho V_1 = \rho A_1 x_1 = \rho A_1 v_1 \Delta t$$

وفي أثناء الفاصل الزمني نفسه، تساوي كتلة الماء التي تمر أمام النقطة 2

$$\Delta m_2 = \rho V_2 = \rho A_2 x_2 = \rho A_2 v_2 \Delta t$$

ولكن عندما يكون الجريان مستقراً، لا بد للكتلة التي تعبر مقطعاً معيناً في الأنبوب خلال الفاصل الزمني Δt أن تعبر أي مقطع فيه خلال الفاصل الزمني نفسه. ومِنْ ثَمَّ لدينا:

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

أو $$\rho A_1 v_1 \Delta t = \rho A_2 v_2 \Delta t \quad (14.6)$$

إن الكمية $\rho A v$ تمثل معدل جريان كتلة المائع:

معدل جريان الكتلة $$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho A v \ (\text{SI unit: kg/s}) \quad (14.7)$$

ولما كانت الفواصل الزمنية Δt هي نفسها، نصَّت المعادلة 14.7 على أن معدل جريان الكتلة أمام أي نقطتين هو نفسه. ولما كانت كثافة المائع غير القابل للانضغاط ثابتة، وَجَبَ أن يكون معدل الجريان الحجمي أمام أي نقطتين نفسه:

معدل الجريان الحجمي $$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A v \ (\text{SI unit: m}^3\text{/s}) \quad (14.8)$$

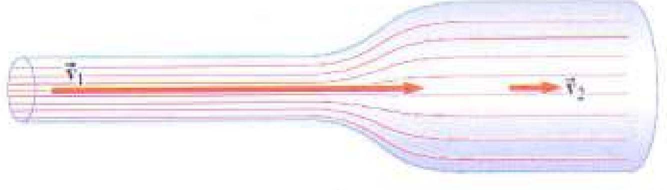
معادلة الاستمرارية لأي مائع غير قابل للانضغاط تساوي بين معدلي الجريان الحجمي أمام نقطتين مختلفتين:

معادلة الاستمرارية لمائع غير قابل للانضغاط $$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (14.9)$$

إذا كان المقطع أسطواني الشكل فستكون سرعة جريان المائع حيث يكون نصف القطر كبيراً، أصغر من سرعته حيث يكون نصف القطر صغيراً. ثمة مثال شائع هو ما يحدث لدى استخدام إبهامك في إغلاق نهاية خرطوم الحديقة جزئياً بهدف تشكيل نافورة مائية. يتحرك الماء أمام إبهامك، حيث تكون مساحة

المقطع أصغر من مساحة مقطع الخرطوم، ما يجعل الماء يتحرك بسرعة أكبر من الحالة العادية. وبالمثل فإن الماء الذي يجري في نهر تزيد سرعته مشكلاً دوّامات عندما يضيق حوض النهر أو يغلق جزئياً بالصخور وبالجلاميد.

تكون خطوط التيار متقاربة فيما بينها حيث يجري المائع سريعاً ومتباعدة فيما بينها حيث يجري بطيئاً (الشكل14.10). ومن ثم تساعدنا خطوط التيار في إظهار جريان المائع.



الشكل14.10. خطوط التيار في أنبوب متغير مساحة المقطع. تكون خطوط التيار أكثر تقارباً فيما بينها حين تكون سرعة المائع أكبر وأكثر تباعداً حين تكون السرعة أخفض.

مثال14.3. تطبيق على معادلة الاستمرارية: سرعة جريان الدم

يضخ القلب الدم في الأبهر، الذي يبلغ نصف قطره الداخلي 1.0 cm. يغذي الأبهر 32 شرياناً رئيسياً. إذا كان الدم في الأبهر يجري بسرعة 28cm/s، فما متوسط سرعة جريانه في الشرايين؟ افرض أنه يمكن التعامل مع الدم على أنه مائع مثالي، وأن القطر الداخلي لكل شريان من الشرايين 0.21cm ؟

فكرة الحل. لما فرضنا بأن الدم مائع مثالي فيمكن لنا تطبيق معادلة الاستمرارية. حيث يتصل الأنبوب الرئيسي (الأبهر) بالأنابيب المتعددة (الشرايين)، ومن ثم تبدو المسألة أكثر تعقيداً مما لو كان لدينا أنبوب وحيد فيه تضيُّق. لكن يمكن تلمُّس المهم في هذه الحالة؛ فمساحة المقاطع الكلية هي المؤثرة.

الحل. نبدأ بإيجاد مساحة مقطع الأبهر

$$A_1 = \pi r_{aorta}^2$$

المساحة الكلية لمقاطع الشرايين

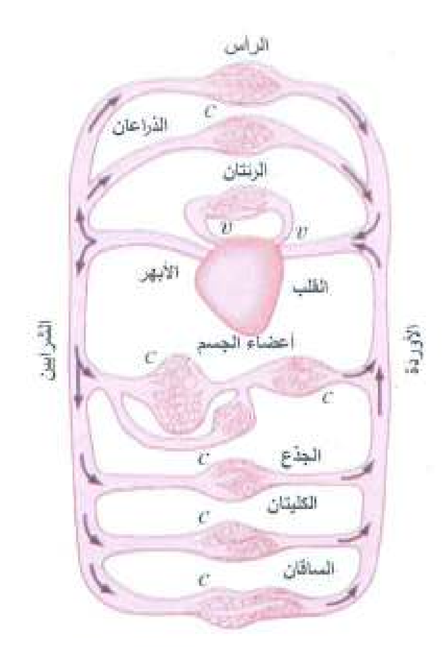
$$A_2 = 32\pi r_{artery}^2$$

نطبق معادلة الاستمرارية ونحل لحساب سرعة جريان الدم في الشرايين.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = 0.28m/s \times \frac{\pi \times (0.010m)^2}{32\pi \times (0.0021m)^2} = 0.20m/s$$

المناقشة. يتباطأ جريان الدم في الشرايين لأن مساحة المقاطع الكلية أكبر من مساحة مقطع الأبهر. ويحدث مثل ذلك عندما ينتقل الدم من الشرايين إلى الشعيرات الدموية في الجسم (الشكل14.11). لكل شعيرة مساحة مقطع صغيرة جداً، ولكن يوجد الكثير منها بحيث يتباطأ الدم فيها كثيراً، مما يتيح الفرصة لتبادل الأكسجين وثاني أكسيد الكربون والمواد الغذائية بين الدم ونسج الجسم.



الشكل14.11. الدورة الدموية لدى الإنسان.

مثال14.4. عدد الشعيرات الدموية في جهاز الدوران

يقدّر نصف قطر الشريان الأبهر لدى شخص معين بنحو $1.2cm$، وتقدّر سرعة جريان الدم فيه بنحو $40cm/s$. ويقدّر نصف قطر الشعيرة الدموية عادة بنحو $4\times10^{-4}cm$ ويسري الدم فيها بسرعة $5\times10^{-4}m/s$، فما عدد الشعيرات الدموية في الجسم؟

الحل. نفترض أن كثافة الدم لا تتغير بشكل ملحوظ من الأبهر نحو الشعيرات الدموية.

يتوجب على معدل الجريان الحجمي في الشريان الأبهر، بحسب معادلة الاستمرارية، أن يساوي معدل الجريان الحجمي في الشعيرات الدموية. تعطى المساحة الكلية لمقاطع الشعيرات الدموية بحاصل ضرب مساحة مقطع إحدى هذه الشعيرات بعددها الكلي.

ليكن A_1 مساحة مقطع الشريان الأبهر و A_2 مساحة مقاطع جميع الشعيرات الدموية التي يجري فيها الدم. يكون في هذه الحالة $A_2 = N\pi r_{cap}^2$، حيث $r_{cap} \approx 4\times10^{-4}cm$ القيمة المقدَّرة الوسطية لنصف قطر الشعيرة الدموية الواحدة.

لدينا من معادلة الاستمرارية:

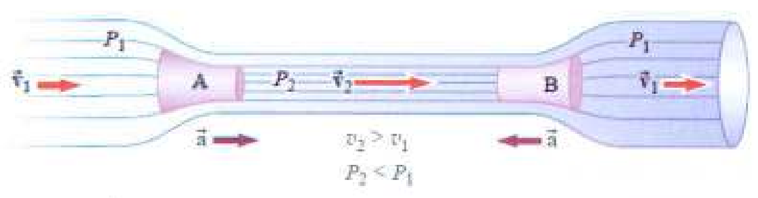
$$A_2v_2 = A_1v_1$$

$$v_2N\pi r_{cap}^2 = v_1\pi r_{aorta}^2$$

$$N = \frac{v_1}{v_2}\frac{r_{aorta}^2}{r_{cap}^2} = \left(\frac{0.40m/s}{5\times10^{-4}m/s}\right)\left(\frac{1.2\times10^{-2}m}{4\times10^{-5}m}\right) \approx 7\times10^9$$

أي أن عددها من مرتبة عشرة مليارات.

14.3.3. معادلة برنولي

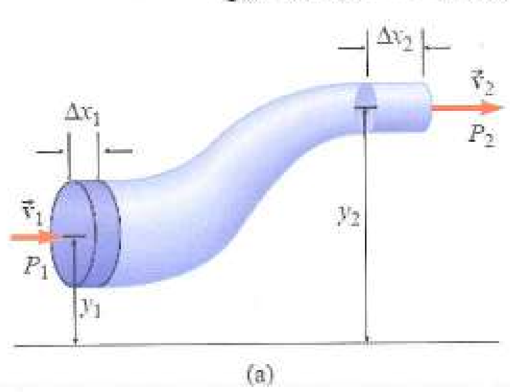


الشكل14.12. يتسارع حجم صغير من المائع عندما يعبر تضيقاً (الموقع A) ثم يتباطأ لدى مغادرته التضيق (الموقع B).

تربط معادلة برنولي بين سرعة المائع في نقطة معينة والضغط عند تلك النقطة، بينما تربط معادلة الاستمرارية بين سرعتي جريان مائع مثالي في نقطتين مختلفتين من أنبوب، بالاعتماد على تغير مساحة مقطعه. يجب على المائع، وفقاً لمعادلة الاستمرارية أن يتسارع عندما يدخل تضيقاً (الشكل14.12)، ثم يتباطأ إلى سرعته الابتدائية. نبين فيما يلي باستخدام أفكار الطاقة أن ضغط المائع في التضيق P_2 لا يمكن أن يكون له القيمة نفسها قبل التضيق P_1

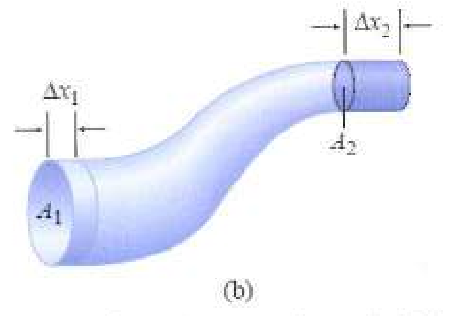
أو بعده؛ لتكون السرعة في الجريان الأفقي أعلى حيث يكون الضغط أخفض. يدعى هذا المبدأ مفعول برنولي Bernoulli effect.

يمكن أن يبدو مفعول برنولي لأول وهلة مخالفاً للحدس؛ ألا يكون المائع الذي يجري بسرعة عالي الضغط؟ فإذا أصبت على سبيل المثال بالماء السريع من خرطوم الإطفاء فإنك تقذف بسهولة. القوة التي تقذف بك تعود فعلاً إلى ضغط المائع؛ ومِنْ ثَمّ تستنتج أنه من المنطقي أن يكون الضغط مرتفعاً. غير أنه لا يكون الضغط مرتفعاً إلى أن تقوم بتبطيء الماء. الماء الذي يتحرك بسرعة في النافورة له الضغط الجوي (الضغط العياري الصفر)، ولكن عندما توقف الماء، يزداد ضغطه بشكل كبير.



سنوجد العلاقة الكمية بين تغيرات الضغط وتغيرات سرعة الجريان في مائع مثالي. يجري الحجم المظلل من المائع في الشكل 14.13 نحو اليمين. فإذا تحرك المائع عند النهاية اليسرى إلى اليمين المسافة Δx_1، فإن المائع الطرف الأيمن يتحرك المسافة Δx_2. ولما كان المائع غير قابل للانضغاط، كان

$$A_1 \Delta x_1 = A_2 \Delta x_2 = V$$



الشكل 14.13. تطبيق انحفاظ الطاقة على جريان مائع مثالي. الحجم المظلل من المائع في (a) يجري نحو اليمين؛ في (b) يظهر حجم المائع نفسه بعد برهة زمنية.

يقوم المائع المجاور بعمل أثناء هذا الجريان. فالمائع الخلفي (إلى اليسار) يدفع إلى الأمام، باذلاً عملاً موجباً، في حين أن المائع في الأمام يدفع نحو الخلف باذلاً عملاً سالباً. فيكون العمل الكلي المبذول على الحجم المظلل من قبل المائع المجاور:

$$W = P_1 A_1 \Delta x_1 - P_2 A_2 \Delta x_2 = (P_1 - P_2)V$$

نظراً لعدم وجود قوى تبديدية في مائع مثالي، فإن العمل المبذول يساوي التغير الكلي في الطاقتين الحركية والكامنة الثقالية. إن التأثير الصافي للإزاحة هو تحريك حجم المائع V من الارتفاع y_1 إلى الارتفاع y_2 ولتغير سرعته من v_1 إلى v_2. ومِنْ ثَمّ فإن تغير الطاقة:

$$\Delta E = \Delta K + \Delta U = \tfrac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2) + mg(y_2 - y_1)$$

حيث الاتجاه $+y$ نحو الأعلى. وبالتبديل $m = \rho V$ وبمساواة العمل المبذول على المائع مع التغير في طاقته نجد:

$$(P_2 - P_1)V = \tfrac{1}{2}\rho V(v_2^2 - v_1^2) + \rho V g(y_2 - y_1)$$

بتقسيم طرفي المعادلة على V وترتيبها نحصل على معادلة برنولي:

معادلة برنولي (جريان مائع مثالي) المعروفة بالشكل التالي لتشير إلى الانحفاظ:

$$P_1 + \rho g y_1 + \tfrac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \rho g y_2 + \tfrac{1}{2}\rho v_2^2$$

$$P + \rho g y + \tfrac{1}{2}\rho v^2 = \text{constant} \quad \text{أو} \qquad (14.10)$$

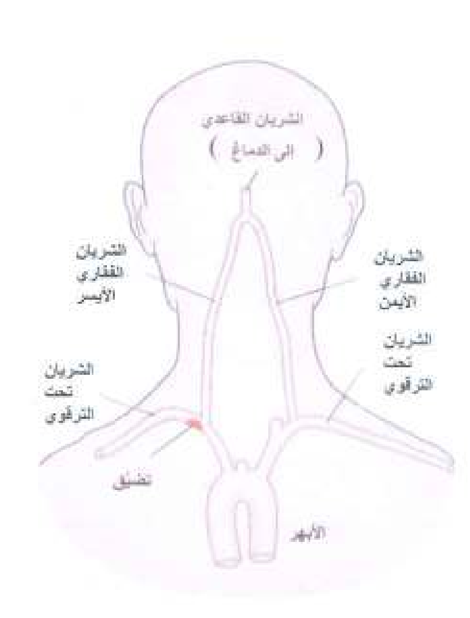
تربط معادلة برنولي بين الضغط وسرعة التدفق والارتفاع بين نقطتين في مائع مثالي. على الرغم من أننا اشتققنا معادلة برنولي في حالة بسيطة نسبياً، فهي تطبق على جريان أي مائع مثالي طالما تقع النقطتان على خط التيار نفسه.

لكل حد من حدود معادلة برنولي أبعاد الضغط، أي الباسكال أو N/m^2. ولما كانت وحدة الجول هي نيوتن – متر نجد بعد ضرب البسط والمقام بالمتر، أن الباسكال هي أيضاً الجول على متر مكعب J/m^3. وكل حد في المعادلة يمثل العمل أو الطاقة في وحدة الحجم. والضغط هو العمل الذي يقوم به المائع على المائع الذي يتقدمه في وحدة الجريان. وكذلك فإن حد الطاقة الحركية $\frac{1}{2}\rho v^2$ يقابل طاقة لكل وحدة الحجم والطاقة الكامنة الثقالية $\rho g y$ في وحدة الحجم.

ناقش معادلة برنولي في حالتين خاصتين: (a) الجريان الأفقي $y_1 = y_2$ و (b) مائع ساكن $v_1 = v_2$

14.3.4. بعض تطبيقات مبدأ برنولي

نوبة نقص تروية عابرة. من التطبيقات الكثيرة لقاعدة برنولي في الطب تفسير نوبة نقص التروية العابرة a TIA transient ischemic attack. يمكن أن يخضع الشخص الذي يعاني TIA لأعراض كالدوار، والشفْع double vision، وآلام في الرأس وضعف الأطراف. يمكن أن يحدث القصور على النحو التالي: يتدفق الدم عادة إلى الأعلى نحو الدماغ خلف الرأس عن طريق شريانين فقاريين – يصعد كل واحد منهما من جانب– ويلتقيان ليشكلا الشريان القاعدي تحت الدماغ تماماً على النحو المبين في الشكل14.14. يتفرع الشريانان الفقاريان عن الشريانين تحت الترقوة subclavian، كما هو مبين في الشكل14.14، قبل أن يمر هذان الأخيران نحو الذراعين.



الشكل14.14. منظر خلفي للرأس والكتفين يبين الشرايين التي تذهب للدماغ والذراعين.

عندما تتدرب الذراع بقوة يزداد تدفق الدم ليلبي حاجة عضلات الذراع. فإذا أغلق الشريان تحت الترقوة في أحد جانبي الجسم جزئياً، كما في التصلب الشرياني arteriosclerosis (تقسّي الشرايين)، يترتب على سرعة الدم أن ترتفع عند ذلك الجانب لتوفير الدم اللازم. (تذكر أن معادلة الاستمرارية: المساحة الأصغر

تعني سرعة أكبر في حالة معدل الجريان نفسه المعادلة 14.9). يؤدي تزايد سرعة الدم أمام فتحة الشريان الفقاري إلى انخفاض الضغط (قاعدة برنولي). ومِنْ ثَمَّ يمكن للدم الذي يصعد في الشريان الفقاري عند الجانب الصحيح بالضغط النظامي أن يتحول diverted down إلى الشريان الفقاري الآخر بسبب انخفاض الضغط في ذلك الجانب عوضاً عن الصعود للأعلى نحو الدماغ. ومن ثم تنخفض مؤونة الدماغ من الدم.

التضيق الشرياني والتوسع الشرياني arterial flutter and aneurysm

لنفرض أن شرياناً تضيق نتيجة لتراكم لويحي على جدرانه الداخلية. إن جريان الدم في التضيق يشبه ما هو في الشكل14.12. تنبئنا معادلة برنولي أن الضغط P_2 في التضيق يكون أخفض منه في مكان آخر. تكون جدر الشريانية مرنة وليس قاسية، ومِنْ ثَمَّ يسمح الضغط الأخفض للجدر الشريانية بالتقلص قليلاً في التضيق. تكون سرعة الجريان في هذه الحالة حتى أعلى والضغط حتى أخفض. ينقبض الجدار الشرياني في نهاية المطاف، مغلقاً جريان الدم. ثم يتراكم الضغط ويعود فيفتح الشريان، ويسمح للدم بالجريان. ثم تبدأ حلقة الرفة الشريانية ثانية.

يمكن حدوث الحالة المعاكسة، حيث يكون الجدار الشرياني ضعيفاً. يقوم ضغط الدم بدفع جدر الشريان نحو الخارج، مشكلاً انتفاخاً يدعى تمدد aneurysm، يترافق انخفاض سرعة الجريان في الانتفاخ بارتفاع ضغط الدم، الأمر الذي يكبر أم الدم أكثر (المسألة14.3). يمكن في نهاية الأمر أن ينفجر الشريان من الضغط المتزايد.

مسألة14.3. في أم دم الأبهر، يتشكل انتفاخ حيث تضعف جدر الأبهر. فإذا كان الدم الذي يجري في الأبهر (نصف قطره 1.0cm) يدخل انتفاخاً نصف قطره 3.0cm، فكم يكون الارتفاع الوسطي في ضغط الدم في الانتفاخ بالنسبة للضغط في جزء الأبهر الذي لم يتوسع؟ يبلغ معدل الجريان الوسطي في الأبهر $120cm^3/s$. افرض أن الدم غير لزج، وأن المريض مُسْتَلْقٍ ومِنْ ثَمَّ لا يوجد تغير في الارتفاع.

14.3.5. اللزوجة

تهمل معادلة برنولي اللزوجة viscosity (احتكاك الموائع). حيث يمكن لمائع مثالي وفقاً لمعادلة برنولي أن يستمر بالجريان في أنبوب أفقي بسرعة ثابتة تلقائياً، تماماً كالكرة التي تنزلق على الجليد من دون احتكاك بسرعة ثابتة من دون أن تدفع بأي شي كما في لعبة hockey puck.

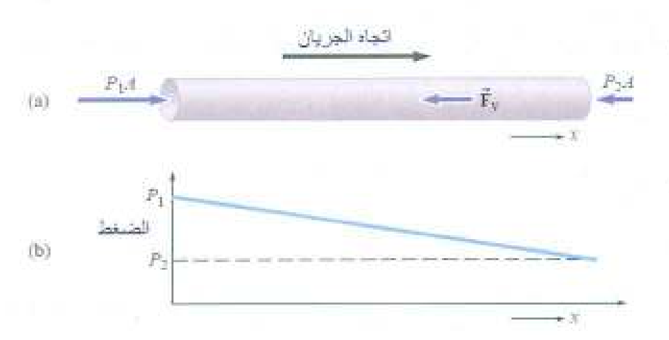
غير أن جميع الموائع تبدي بعض اللزوجة؛ للإبقاء على الجريان في مائع لزج، يترتب تطبيق قوة خارجية لأن قوى اللزوجة تعاكس جريان المائع (الشكل14.15). يجب الإبقاء على فارق ضغط بين طرفي الأنبوب

للإبقاء على جريان السائل الحقيقي في أنبوب أفقي مستمراً. إن فارق الضغط ضروري في كل شيء – من الدم الذي يجري في الشرايين إلى الزيت الذي يضخ في خط أنابيب الزيت.

لتجسيد الجريان اللزج في أنبوب دائري المقطع، تخيل المائع يجري في طبقات أسطوانية الشكل. فإذا لم يكن ثمة لزوجة، فإن جميع الطبقات سوف تتحرك بالسرعة نفسها (الشكل14.16a).

أما في الجريان اللزج، فتعتمد سرعة المائع على البعد عن جدران الأنبوب الساكنة (الشكل 14.16b). يكون أسرع جريان للطبقة في مركز الأنبوب. أما الطبقات الأقرب إلى الجدران فتتحرك ببطء، حيث تظل الطبقة الخارجية الملاصقة للأنبوب ساكنة لا تتحرك. تطبق كل طبقة من المائع قوى لزوجة على الطبقات المجاورة؛ هذه القوى تعاكس الحركة النسبية للطبقات. وأما أبعد طبقة فتطبق قوة لزوجة على الأنبوب. ففي مثل هذا الجريان الطبقي يمكن تعريف معامل لزوجة المائع بأنه ثابت التناسب بين تدرج السرعة $\partial v/\partial r$، أي ازدياد سرعة الطبقة مع البعد عن جدار الأنبوب، والقوة المطبقة على واحدة المساحة F/A للإبقاء على هذا التدرج أي:

$$\eta = (F/A)/(\Delta v/\Delta r)$$



الشكل14.15. (a) للإبقاء على الجريان اللزج، يجب تطبيق قوة صافية، بفعل ضغط السائل تساوي $(P_1 - P_2)A$ في اتجاه التدفق لتتوازن مع قوة اللزوجة F_v الناجمة عن الأنبوب، التي تعاكس الجريان. (b) الضغط في المائع يتناقص من P_1 إلى P_2 إلى يمين القناة.



الشكل14.16. (a) في الجريان غير اللزج في أنبوب تكون سرعة الجريان هي نفسها في كل مكان. (b) في الجريان اللزج، تعتمد سرعة الجريان على البعد عن جدران الأنبوب. يبين هذا المخطط المبسط طبقات المائع، حيث تتحرك كل طبقة بسرعة مختلفة، ولكن السرعة عملياً تتزايد باستمرار من أبعد طبقة عن المركز بدءاً من الصفر إلى المركز بأعلى سرعة.

يكون السائل أكثر لزوجة بقدر ما تكون قوى التلاصق بين الجزيئات أكبر. وتنخفض لزوجة سائل بارتفاع درجة حرارته، لأن الجزيئات تصبح أقل ارتباطاً. ترتفع لزوجة الدم مثلاً، مع انخفاض درجة حرارة الجسم

ويصعب جريان الدم في الجسم. أما الغازات، من جهة أخرى، فتزداد لزوجتها مع ارتفاع درجة الحرارة، نظراً لزيادة سرعة جزيئات الغاز في درجات مرتفعة من الحرارة ويتزايد تصادمها فيما بينها.

يكتب معامل لزوجة مائع (أو فقط لزوجة) بالحرف اليوناني η ووحدته في الجملة الدولية باسكال. ثانية pascal.s(Pa.s). من واحدات اللزوجة الأخرى التي يشيع استخدامها البواز poise و (1P=0.1Pa). يضم الجدول14.2 لزوجة بعض الموائع الشائعة.

14.3.6. قانون بوازوي Poiseuille

يعتمد معدل الجريان الحجمي $\Delta V/\Delta t$ في حالة الجريان الرقائقي لمائع في أنبوب أسطواني أفقي على عدة عوامل. أولاً أن معدل الجريان الحجمي يتناسب طردياً مع هبوط الضغط في واحدة الطول $\Delta P/L$، ويدعى أيضاً تدرج الضغط. فإذا كان هبوط الضغط ΔP يحافظ على معدل جريان معين في أنبوب طوله L، فإن أنبوباً مماثلاً طوله $2L$ يحتاج إلى ضعف هبوط الضغط للإبقاء على معدل الجريان نفسه (ΔP في النصف الأول و ΔP في النصف الثاني). ومِنْ ثَمَّ يجب أن يتناسب معدل الجريان $\Delta V/\Delta t$ مع هبوط الضغط في واحدة الطول $\Delta P/L$.

وثانياً أن معدل الجريان يتناسب عكسياً مع لزوجة المائع. وبقدر ما يكون المائع أكثر لزوجة، يكون معدل الجريان أخفض، في حال تساوي العوامل الأخرى.

وأما الاعتبار الأخير فهو نصف قطر الأنبوب. في القرن التاسع عشر، في أثناء دراسة الجريان في الأوعية الدموية، اكتشف الطبيب الفرنسي جان ليونارد ماري بوازوي 1869-1799 أن معدل التدفق يتناسب طردياً مع القوة الرابعة لنصف قطر الأنبوب:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t}=\frac{\pi}{8}\frac{\Delta P/L}{\eta}r^4 \qquad (14.11)$$

حيث $\Delta V/\Delta t$ معدل الجريان الحجمي، ΔP فارق الضغط بين طرفي الأنبوب، r و L نصف القطر الداخلي للأنبوب وطوله على الترتيب، و η لزوجة المائع.

لا نصادف كثيراً العلاقة بالقوة الرابعة، فلماذا يوجد مثل هذه العلاقة بنصف القطر؟ يكمن الجواب في: أولاً إذا كانت الموائع تسري بالسرعة نفسها في أنبوبين مختلفين فإن معدلي الجريان الحجمي يتناسبان طردياً مع مربع نصف القطر (الجريان الحجمي يساوي حاصل ضرب السرعة بمساحة المقطع). ولكن في حالة الجريان اللزج تكون سرعة الجريان المتوسطة أكبر في حالة الأنابيب العريضة، والمائع الأبعد عن الجدران يمكن أن يجري بسرعة أكبر. يتبين أن متوسط سرعة الجريان في حالة تدرج معين للضغط

يتناسب أيضاً طردياً مع مربع نصف القطر مما يعطي علاقة القوة الرابعة الإجمالية مع نصف قطر الأنبوب في قانون بوازوي.

إن العلاقة القوية لمعدل الجريان بنصف القطر مهمة في جريان الدم. فالشخص المصاب بمرض وعائي قلبي تكون الشرايين عنده متضيقة بالتوضعات الصفيحية. وللإبقاء على الجريان الضروري للدم لقيام الجسم بوظائفه، يرتفع ضغط الدم. فإذا تضيق قطر شريان إلى نصف قيمته الأصلية بفعل التوضعات اللويحية، فإن معدل جريان الدم ينخفض إلى 1/16 من قيمته الأصلية إذا بقي هبوط الضغط فيه على حاله. للتعويض عن جزء من هذا الانخفاض في جريان الدم، فإن القلب يجهد في الضخ، مما يزيد ضغط الدم. وارتفاع ضغط الدم ليس جيداً أيضاً، فهو يدخل المشكل الصحية الخاصة به، ليس أقلها تزايد الطلب على العضلة القلبية.

الجدول14.2. قيم اللزوجة لبعض الموائع

المادة	درجة الحرارة °C	اللزوجة Pa.s	المادة	درجة الحرارة °C	اللزوجة Pa.s
الغازات			الماء	0	1.8×10^{-3}
بخار الماء	100	1.3×10^{-5}		20	1.0×10^{-3}
الهواء	0	1.7×10^{-5}		30	0.80×10^{-3}
	20	1.8×10^{-5}		40	0.66×10^{-3}
	30	1.9×10^{-5}		60	0.47×10^{-3}
	100	2.2×10^{-5}		80	0.36×10^{-3}
السوائل				100	0.28×10^{-3}
الأستون	30	0.30×10^{-3}	بلازما الدم	37	1.3×10^{-3}
الميثانول	30	0.51×10^{-3}	الدم الكامل	20	3.0×10^{-3}
الإيثانول	30	1.0×10^{-3}		37	2.1×10^{-3}
الغليسرين	20	0.83	SAE5W-30 motor oil	-30	≤ 6.6
	30	0.63		150	$\geq 2.9\times10^{-3}$

مثال14.5. الانسداد الشرياني

طبيب قلبية يكتب تقريراً لمريضه أن نصف قطر الشريان الداخلي anterior النازل من القلب تضيق بمقدار 10.9%. ما الزيادة المئوية في هبوط ضغط الدم التي يحتاج إليها للإبقاء على جريان الدم في الشريان طبيعياً؟

الحل. نفرض أن لزوجة الدم لم تتغير، وكذلك طول الشريان. للإبقاء على الجريان الطبيعي للدم، يجب أن يبقى معدل الجريان الحجمي نفسه:

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t}=\frac{\Delta V_2}{\Delta t}$$

إذا كان r_1 نصف القطر الطبيعي و r_2 نصف القطر الحالي، فإن انخفاضاً قدره 10.0% بنصف القطر يعني $r_2 = 0.900 r_1$، ومن ثم فإن قانون بوازوي

$$\frac{\pi \Delta P_1 r_1^4}{8\eta L} = \frac{\pi \Delta P_2 r_2^4}{8\eta L}$$

$$r_1^4 \Delta P_1 = r_2^4 \Delta P_2$$

نحل من أجل نسبة الهبوطين:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \frac{r_1^4}{r_2^4} = \frac{1}{(0.900)^4} = 1.52$$

المناقشة. يعني العامل 1.52 أنه توجد زيادة قدرها 52% في فرق ضغط الدم في الشريان. والضغط المتزايد لا بد أن يوفه القلب. إذا كان الهبوط النظامي في الضغط في القلب يساوي $10 mmHg$ فإنه في هذه الحالة $15.2 mmHg$. إن ضغط دم الشخص إما يجب أن يزداد بمقدار $5.2 mmHg$، وإمّا سيكون هناك انخفاض في جريان الدم في الشريان. يكون القلب تحت انفعال أكبر عندما يعمل أكثر، محاولاً الإبقاء على تدفق كاف للدم.

14.3.7. الاضطراب

يصح تقريب الحركة الطبقية عندما تكون سرع الجريان صغيرة وعندما ترتفع سرعة المائع في نقطة معينة، يكون الجريان غير مستقر ويصبح اضطرابياً. يمثل الاضطراب turbulence الحالة الحدية للجريان غير المستقر (الشكل14.17).



الشكل14.17. الجريان المضطرب لغاز يخرج من خرطوم رذّاذ.

وتظهر في الجريان المضطرب دوامات للمائع whirlpools. والدوامات غير مستقرة؛ فهي تنتقل مع المائع. وتصبح سرعة الجريان في أي نقطة عشوائية؛ من الصعب التنبؤ عن اتجاه أو سرعة جريان المائع في شروط الاضطراب.

14.3.8. مقاومة اللزوجة

عندما يتحرك جسم في مائع، يطبق المائع قوة مقاومة عليه. وعندما تكون السرعة النسبية بين الجسم والمائع منخفضة إلى حد يكفي لأن يكون الجريان حول الجسم رقائقياً، تشتق قوة المقاومة من اللزوجة وتدعى مقاومة اللزوجة viscous drag. تتناسب قوة اللزوجة طردياً مع سرعة الجسم. وفي حالة سرعات نسبية أكبر تتناسب قوة المقاومة مع مربع سرعة الجسم.

تعتمد قوة مقاومة اللزوجة أيضاً على شكل وأبعاد الجسم. ففي حالة جسيم كروي تعطى قوة مقاومة اللزوجة بقانون ستوكس

(14.12) **قانون ستوكس (مقاومة اللزوجة على كرية)** $F_D = 6\pi\eta rv$

حيث r نصف قطر الكريّة، و η لزوجة المائع، و v سرعة الجسم بالنسبة للمائع. ومِنْ ثَمَّ ستزداد مقاومة اللزوجة مع السرعة النسبية فإنها ستزداد حتى تصبح قيمتها معاكسة للقوة المحركة لتصبح مجموع القوى المؤثرة في عنصر حجمي معدومة وتتوقف السرعة عن الازدياد تسمى السرعة المقابلة السرعة الحدية أو النهائية.

مسألة عملية14.4. الفقاعة الصاعدة

أوجد السرعة النهائية لفقاعة من الهواء نصف قطرها 0.500mm في فنجان زيت نباتي. الوزن النوعي للزيت 0.840 ولزوجته 0.160Pa.s افرض أن قطر الفقاعة لا يتغير في أثناء الصعود.

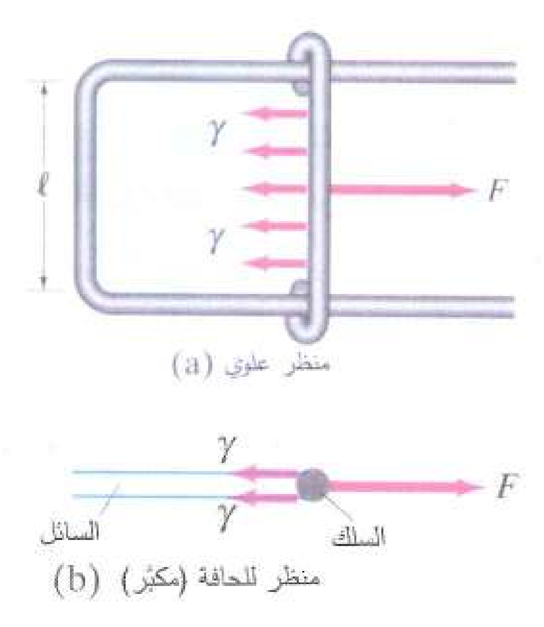
نشاط منزلي. يمكن في المنزل القيام بإظهار السرعة النهائية. قم بالصعود إلى شرفة منزلك، وقم بإسقاط جسمين في الوقت نفسه: قطعة نقود ومرشحين أو ثلاثة من مرشحات القهوة المخروطية الشكل. سوف ترى مفعول مقاومة اللزوجة على مرشحات القهوة أثناء سقوطها بسرعة حدية ثابتة، لكنه تصعب ملاحظة ذلك على قطعة النقود. استعن بصديق ليصور لك منظراً جانبياً للجسمين الساقطين. لماذا تقوم مرشحات القهوة جيداً بهذا الدور؟

14.3.9. تطبيق على مقاومة اللزوجة: سرعة التثفل والطرد المركزي

في حالة الجسيمات الصغيرة التي تسقط في سائل، تدعى السرعة النهائية أيضاً سرعة التثفل sedimentation velocity. غالباً ما تكون سرعة التثفل صغيرة لسببين. الأول أنه إذا لم يكن الجسيم أكبر كثافة بكثير من المائع، فإن المجموع الشعاعي لقوى الثقالة والطفوّ يكون صغيراً. والثاني أن السرعة النهائية تتناسب طردياً مع r^2؛ وأن مقاومة اللزوجة متناسبة مع r لذلك فهي أكبر أهمية في حالة الجسيمات الصغيرة. ولذلك يمكن أن تستغرق الجسيمات زمناً طويلاً للتثفل في المحلول ولو كان تأثير الثقل وحْدَه هو الذي يعين سرعة التثفل من خلال تسارع الجاذبية g. لأن سرعة التثفل تتناسب طردياً مع g، فيمكن زيادتها باستخدام جهاز الطرد المركزي centrifuge وهو وعاء دوّار يحدث ثقالة صنعية قيمتها $g_{eff} = \omega^2 r$ (التسارع في الحركة الدورانية). يمكن لأجهزة الطرد المركزي الفائقة أن تقوم بالدوران بمعدل $10^5 rev/\min$ وتولد ثقالة صنعية قريبة من مليون ضعف g.

14.4. التوتر السطحي

يتميز سطح سائل بعدة صفات خاصة غير موجودة في داخله. إذ يعمل السطح كغشاء مشدود بفعل التوتر. يعرَّف التوتر السطحيsurface tension لسائل (ويرمز له بالحرف اليوناني γ) بأنه القوة في واحدة الطول التي يؤثر بها السطح على حافته. واتجاه هذه القوة مماس للسطح عند حافته. ينجم التوتر السطحي عن قوى التلاصق التي تجذب الجزيئات بعضها إلى بعض. يعود سبب هذا التعريف لتجربة قياسه التالية: يجعل إطار على شكل حرف U مستوياً ويُغْلَقُ طرفه المفتوح قضيبٌ قابل للتدحرج على حرفيه، ثم يغمر في سائل، فنجد أن هناك حاجة لتطبيق قوة على القضيب المتدحرج لمنعه من التدحرج، (الشكل14.18)، وتكبر القوة اللازمة مع طول القضيب الفعال (البعد بين طرفي الإطار) وبما أنها ناتجة عن وجود سطح السائل فيمكن تعيين التوتر السطحي وفق التعريف السابق فهو يتغير بتغير السائل.



الشكل14.18. أداة سلكية على شكل الحرف U تحمل غشاء من السائل لقياس التوتر السطحي

$$\gamma = (F/2\ell)$$

يمكن، في الواقع، النظر للتوتر السطحي على أنه طاقة كامنة، وذلك باعتبار أن زيادة السطح يحتاج إلى صرف عمل، ويختزن هذا العمل في السطح على شكل طاقة سطحية؛ ويمكن تبين ذلك إذا ضربنا البسط والمقام المعرف للتوتر السطحي بانتقال Δx، فينتج في البسط طاقة وفي المقام سطح.

إن ارتفاع التوتر السطحي للماء يمكّن العابرات striders المائية والحشرات الصغيرة الأخرى أن تتحرك على سطح بركة. إذ تحدث قدم الحشرة فجوة صغيرة في سطح الماء(الشكل14.19)؛ فيمكّنها تشوه السطح من أن تثبت قدمها فيه، كما لو كان سطح الماء طبقة رقيقة من المطاط. وهي بذلك أشبه بشخص يتحرك على منصة القفز. ثمة حشرات مائية صغيرة أخرى كيرقات ومستورقات البعوض، تتعلق بسطح الماء مستخدمة التوتر السطحي لتتثبت عليه. يساعد التوتر السطحي في النباتات على حمل الماء من الجذور إلى الأوراق.



الشكل14.19. حشرة عابرة لسطح الماء. وعبور الحشرات لسطح بركة من تطبيقات التوتر السطحي.

نشاط منزلي. ضع إبرة (أو ملقطاً للورق مسطحاً مطلياً بالبلاستك) بلطف على سطح كأس من الماء. يمكن أن يحتاج الأمر إلى بعض الخبرة، ولكن يجب عليك أن تجعلها تطفو على سطح الماء. ثم أضف بعض المنظفات للماء وحاول ثانية. من شأن المنظف أن يخفض التوتر السطحي للماء ومِنْ ثَمَّ يصبح غير قادر على دعم الإبرة. تعتبر الصوابين والمنظفات من المواد الخافضة للتوتر السطحي للسوائل. يسمح انخفاض التوتر السطحي للماء بأن ينتشر ويبلل السطح الذي يجب تنظيفه أكثر.

14.4.1. تطبيق على التوتر السطحي: خافض للتوتر السطحي في الرئتين

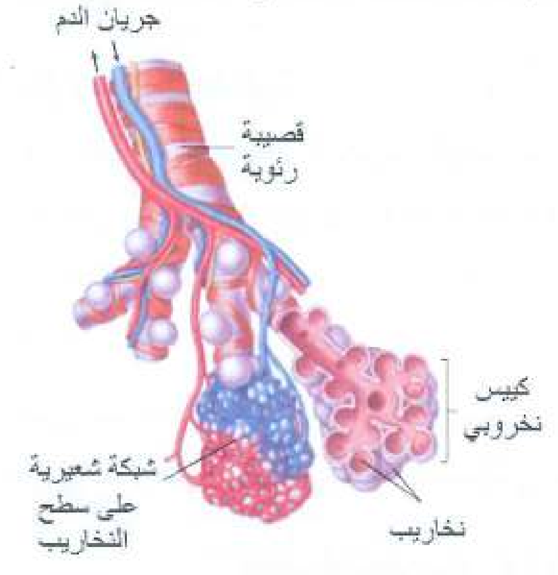
يشكل ارتفاع التوتر السطحي للماء عائقاً في الرئتين. يحدث تبادل الأكسجين وغاز ثاني أكسيد الكربون بين الهواء المستنشق والدم في الجيوب الصغيرة التي تدعى النخاريب الرئوية والتي تقدر أنصاف أقطارها من 0.05 إلى 0.15mm في نهاية القصبات الرئوية (الشكل14.20). فإذا كان للمخاط الذي يغلف النخاريب الرئوية التوتر السطحي نفسه لموائع الجسم الأخرى، فلن يكون فارق الضغط بين داخل النخاريب الرئوية وخارجها كبيراً إلى حد يكفي لكي تتمدد وتمتلئ بالهواء. غير أنَّ النخاريب الرئوية تفرز خافضاً للتوتر السطحي في الغشاء المخاطي كالليستينات lecithines يزداد في طور الشهيق وينخفض في طور الزفير بحيث تظل النسبة $\gamma/2r$ ثابتة، مهما تكن قيمة نصف قطر النخروب. وإن اختفاء هذه القدرة الخافضة للتوتر يحدث ضيقاً في التنفس يمكن أن يؤدي إلى الموت لدى حديثي الولادة.

14.4.2. الفقاعات

يسعى التوتر السطحي في فقاعات الهواء تحت الماء، أن يقلص الفقاعة عندما يدفع ضغط الهواء المحتبس فيها نحو السطح. يجب على ضغط الهواء داخل الفقاعة في حالة التوازن أن يكون أكبر من ضغط الماء خارجها بحيث تتوازن قوة الضغط نحو الخارج مع قوة التوتر السطحي نحو الداخل. يعتمد فائض الضغط $\Delta P = P_i - P_{out}$ على التوتر السطحي وأبعاد الفقاعة. يمكنك في المسألة 14.5 البرهان على أن فائض الضغط يساوي

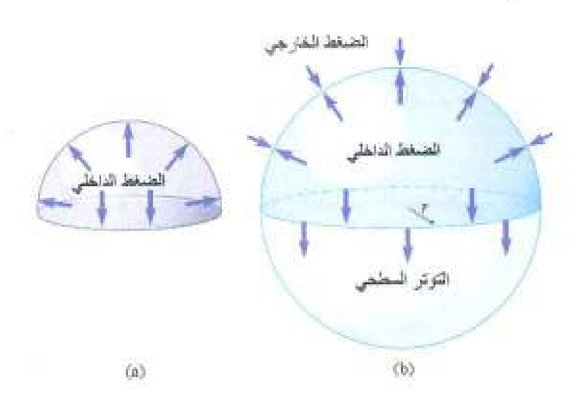
$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \qquad (14.13)$$

انظر جيداً إلى كأس من الشمبانيا، بإمكانك أن ترى خيوطاً من الفقاعات، تنشأ من النقاط نفسها في السائل.



الشكل 14.20. في رئة الإنسان ملايين الجيوب sac الدقيقة التي تدعى النخاريب تنتفخ مع كل نفس. يتم تبادل الغاز بين الهواء والدم من خلال جدران النخاريب. إن المساحة الكلية للسطح التي يحدث التبادل من خلالها تقدر بنحو $80m^2$ أي أكبر 40 مرة من مساحة سطح الجسم.

تتطلب الفقاعة الصغيرة جداً فائضاً كبيراً جداً في الضغط لا يحتمل. تحتاج الفقاعة نواة معينة- ذرة غبار مثلاً- لتتشكل عليها بحيث يمكنها، بفائض في الضغط ليس كبيراً إلى هذا الحد أن تنطلق أكبر. تظهر خيوط الفقاعات في كأس من الشمبانيا حيث توجد النوى المناسبة.



مسألة 14.5. جسم نصف كروي أجوف مملوء بالهواء كما في الجزء (a) من الشكل. (a) برهن على أن قيمة القوة العائدة لضغط المائع على السطح المنحني لنصف الكرة $F = \pi r^2 P$، حيث r نصف قطر نصف الكرة و P ضغط الهواء. قم بإهمال وزن الهواء.

[تلميح: الجسم متوازن لذلك يجب أن يكون مجموع القوى المؤثرة فيه معدومة. (a) أوجد أولاً القوة على السطح المنبسط. ما القوة الصافية على نصف الكرة والعائدة للهواء؟ (b) ادرس فقاعة من الهواء تحت الماء تنقسم إلى نصفي كرة وفق المحيط كما في الجزء (b) من الشكل. يطبق نصف الكرة العلوي لسطح الماء قوة قيمتها $2\pi r\gamma$ (القوة في وحدة الطول مكررة بمقدار طول المحيط) على نصف الكرة السفلي بفعل قوة التوتر السطحي. برهن على أن ضغط الهواء داخل الفقاعة يجب أن يتجاوز ضغط الماء خارجها بالمقدار $\Delta P = 2\gamma / r$.

مثال14.7. ضغط الرئة

يقدر الضغط العياري في النخاريب الرئوية في أثناء الشهيق inhalation بنحو $400 Pa$ – ليسمح للهواء بالجريان في القصبات الرئوية bronchial. لنفرض أن التوتر السطحي للغشاء المخاطي لنخروب رئوي نصف قطره الابتدائي 0.050mm هو نفسه للماء ويساوي 0.050 N/m. ما الضغط الرئوي خارج النخروب للبدء في تضخم النخروب؟

الحل. نقوم بنمذجة النخروب الرئوي بكرة يحيط بها غشاء مخاطي. يجب أن يكون ضغط النخروب الرئوي بفعل التوتر السطحي للغشاء المخاطي خارجه أخفض منه داخله، كما في حالة الفقاعة.

فائض الضغط يساوي $$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} = \frac{2 \times 0.070 N/m}{0.050 \times 10^{-3} m} = 2.8 kPa$$

وهكذا سيكون الضغط داخل النخروب الرئوي أعلى بـ $2.8 kPa$ من الضغط خارجه. إن الضغط العياري في الداخل $-400 Pa$، ومن ثمّ يكون الضغط العياري خارجه

$$P_{out} = -0.4 kPa - 2.8 Pa = -3.2 Pa$$

المناقشة. إن الضغط العياري الفعلي خارج النخروب الرئوي يكون $-0.5kPa$ وليس $-3.8kPa$، ومن ثم فإن $\Delta P = P_{in} - P_{out} = -0.4kPa-(-0.5kPa) = 0.1kPa$. يأتي خافض التوتر في هذه الحالة للإنقاذ rescue؛ بتخفيض التوتر السطحي في المخاط، ينخفض ΔP إلى نحو $0.1kPa$، ويسمح لتمدد النخروب الرئوي بالحدوث. تكون النخاريب الرئوية في حالة حديث الولادة منكمشة، جاعلة فارق الضغط اللازم نحو $4kPa$. إن ذلك النفس الأولي حدث صعب جداً على قدر ما هو مهم.

مسألة عملية 14.6. فقاعات الشمبانيا

تمتلئ الفقاعة في كأس من الشمبانيا بغاز ثاني أكسيد الكربون. وعندما تقع تحت سطح الشمبانيا بمقدار 2cm، يكون نصف قطرها 0.50mm. ما الضغط العياري داخل الفقاعة؟ افرض أن للشمبانيا نفس الكثافة الحجمية المتوسطة للماء وتوتراً سطحياً قدره 0.070N/m.

مثال14.8. حشرة تتنقّل على سطح الماء. تعتبر قاعدة رجل الحشرة كروية الشكل تقريباً، يقدّر نصف قطر تكوّرها بنحو $2.0\times10^{-5}m$. يتم حمل كتلة الحشرة التي تبلغ $0.0030g$ بأرجلها الست بالتساوي. أوجد قيمة الزاوية θ (الشكل14.21) في حالة حشرة تقف على سطح الماء. افرض أن درجة الحرارة $20^{\circ}C$.



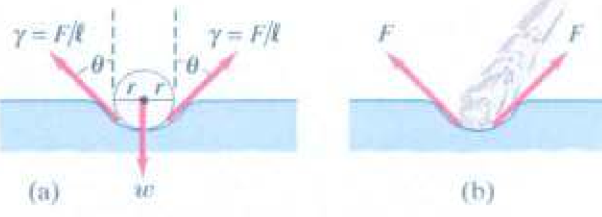
الشكل'14.19. يؤدي سطح الماء دور غشاء يخضع للتوتر، الأمر الذي يسمح لبعوض الماء بالتنقل فوق سطحه.

الحل. بما أن الحشرة في حالة توازن، فإن قوة التوتر السطحي نحو الأعلى تساوي قوة جذب الثقالة الأرضية نحو الأسفل لكل رجل.

نفترض أن التوتر السطحي يعمل على كل رجل وفق دائرة نصف قطرها r وبزاوية θ كما هو مبين في الشكل14.21b. ولا يعمل على حمل الوزن mg إلاّ المركبة الشاقولية للتوتر السطحي $\gamma\cos\theta$. ولذلك نجعل الطول ℓ في معادلة تعريف التوتر السطحي $(\gamma = F/\ell)$ مساوياً محيط الدائرة $\ell \approx 2\pi r$. ومِنْ ثَمَّ فإن المركبة الشاقولية لقوة التوتر السطحي التي تتجه نحو الأعلى تساوي:

$$F_y \approx (\gamma\cos\theta)\ell \approx 2\pi r\,\gamma\cos\theta$$

نجعل هذه القوة تساوي سدس وزن الحشرة نظراً لحيازتها ست أرجل:



الشكل14.20. تأثير التوتر السطحي (a) في كريّة، و (b) في رجل حشرة الشكل14.18.

$$2\pi r\,\gamma\cos\theta \approx \tfrac{1}{6}mg$$

$$(6.28)(2.0\times10^{-5}m)(0.072N/m)\cos\theta \approx \tfrac{1}{6}(3.0\times10^{-6}kg)(9.8m/s^2)\cos\theta$$

$$\cos\theta \approx \frac{0.49}{0.90} = 0.54$$

ومِنْ ثَمّ فإن $\theta \approx 57^\circ C$. فإذا حدث أن كان $\cos\theta$ أكبر من1، فإن التوتر السطحي لن يكون كبيراً إلى حد يكفي لحمل وزن الحشرة.

ملاحظة. لقد أهملنا في حساباتنا القوة الدافعة كما أهملنا الاختلاف الكائن بين نصف قطر رجل الحشرة ونصف قطر انكماش سطح السائل*surface depression*.

بما أن التوتر السطحي هو نتيجة مباشرة لتآثر جزيئات السائل بعضها مع بعض وبسبب غياب عدد كبير من الجزيئات عند السطح الحر للسائل، فإن وجود السائل في إناء يستدعي السؤال عن التآثر بين جزيئات السائل والجزيئات المكونة لمادة الإناء. يوجد عندها ثلاث حالات:

الأولى التآثر بين جزيئات السائل أقوى من التآثر بينها وبين مادة الإناء فينحني سطح السائل مبتعداً عن أطراف الإناء، وهذه حالة الزئبق والزجاج مثلاً.

الثانية أن يكون التآثر بين جزيئات السائل وجزيئات مادة الإناء أقوى من التآثر فيما بينها عندئذ ستمتد جزيئات السائل فوق مادة الإناء قدر المستطاع.

الثالثة أن تكون قيمتا التآثر بين الحالتين المذكورتين. يعبر عن هذه الحالات عادة بزاوية التماس بين السطح الحر للسائل وسطح المادة، (الشكل14.21). وإن اختلاف الضغط نتيجة التوتر السطحي في السطوح المنحنية هو الذي يجعل السائل يرتفع في الأنابيب الشعرية.

الفصل الخامس عشر

الحركات الاهتزازية والموجية

Vibrations & Waves

15.1. أهمية الحركات الاهتزازية والموجية

تترابط الحركات الاهتزازية مع الحركات الموجية، فغالباً ما يقصد بالحركة الاهتزازية حركة كتلة، مثل كتلة معلقة بنابض، ذات مكوّنات تتحرك في طور (زاوي) واحد تقريباً، بينما يقصد بالحركة الموجية حركة مكوّنات الكتلة، مثل الذرات أو الجزيئات، بأطوار مختلفة وإزاحات مختلفة. ويمكن القول إن الحركة الاهتزازية مرتبطة بالمنبع بينما الحركة الموجية مرتبطة بالوسط الذي تنتشر فيه الاضطرابات التي يولدها المنبع. يمكن مقارنة مدى تغير الإزاحة أو الطور لهذا الغرض بطول الموجة أو بحاصل ضرب التواتر بزمن مميز.

ندرس في هذا الفصل الحركات الاهتزازية والطاقات التي تحملها لمناقشة الظواهر الموجية المرتبطة بانتشار كل من الأمواج الصوتية الطولانية وأمواج القصّ العرضانية. حيث يمثل الجزء المتوسط من طيف الأمواج الصوتية، ذلك المجال الذي يتعامل معه جهازا التصويت والاستماع لدى الإنسان. ولحسن الحظ أن مجال التواترات التي تدركها الأذن هي نفسها التي تصدرها الحنجرة، ويطلق على هذا المجال اسم المجال المسموع من الأمواج الصوتية الذي يمتد بين 20Hz و 20kHz، (الشكل1-15).



الشكل15.1.المجالات المختلفة لأغراض مختلفة.

كما تصدر العضلات في حالة الصحة تواتراً يقع في مجال الأمواج تحت الصوتية، وهو نفسه مهما كان حجم العضلة.

لا يخفى على أحد في هذه الأيام دور الأمواج فوق الصوتية في رصد حركة الجنين وأداء صمامات العضلة القلبية لدى استخدامها بالشدات المأمونة. يضاف إلى ذلك أن الأمواج فوق الصوتية أصبحت،

بشدة وتقنية مناسبتين، تستخدم في تفتيت الحصى. كما أن من شأن انزياح دوبلر الذي يطرأ على الأمواج فوق الصوتية المنعكسة عن خلايا الدم الحمراء أن يمكّننا من تحديد سرعة تدفق الدم، والكشف عن حركة صدر الجنين ومراقبة حركاته القلبية. ومع ابتكار عدسات صوتية من نوع خاص مؤخراً أصبح بالإمكان تشكيل طلقات صوتية تقوم بدور جراحي. أخيراً يمكن للأمواج فوق الصوتية الموسومة بنبضة ميكانيكية قصيّة أن تزوّد الطبيب بإصبع جسية افتراضية لتشخيص الكتل والأورام في النسج.

تؤدي عوامل مرونة النسج الطولانية والعرضانية التي عرّفت في الفصل السابق في الحالة التوازنية إلى التعرف على انتشار هذه الأمواج وأشكالها باعتبارها اضطرابات تبتعد عن التوازن قليلاً، وكذلك تأثرها مع النسج وتبادلها للطاقة.

أولاً: الحركات الاهتزازية

15.2. تمهيد للحركات الاهتزازية

الحركة الاهتزازية هي إحدى الحركات التي نصادفها في الطبيعة. ونقول عن جسيم إنه يهتز عندما يتحرك دورياً حول موضع توازنه. على سبيل المثال، حركة النواس الاهتزازية التابعة للزمن المتمثلة بإزاحة مركز كتلته، وكذلك الكتلة المعلقة بنابض مشدود، ستقوم بالاهتزاز حالما نفلتها بعد إزاحتها عن نقطة توازنها، وعلى الصعيد المجهري تهتز الذرات في الجسم الصلب حول مواضع توازنها أيضاً، وبالمثل تهتز الذرات بعضها لبعض في الجزيئات. وفي هوائي الإرسال أو الاستقبال تهتز الإلكترونات اهتزازات سريعة مسببة تغيرات دورية في الحقول الكهرطيسية. وتدرس هذه الاهتزازات على تنوعها، بدءاً من نماذج بسيطة ثم يضاف للنموذج بعض التعديلات ليصبح أكثر واقعية.

تعدّ الحركة الجيبية الحركة الأكثر أهمية من بين جميع الحركات الاهتزازية، ليس فقط لأنها أبسطها من حيث وصفها رياضياً، بل لأنها تشكل تمثيلاً كافي الدقة لكثير من الظواهر الاهتزازية التي نصادفها في الطبيعة، بل يمكن تحليل أي حركة دورية إلى حركات جيبية بتواترات مناسبة.

إذا كان لدينا كتلة مرتبطة بنابض يمكنها أن تتحرك على مستوي أفقي بدون احتكاك، فإنها ستخضع لقوة إرجاع النابض، إذا ما أزيحت عن وضع توازنها بمقدار x، معطاة بقانون هوك:

$$F_s = -kx \qquad (15.1)$$

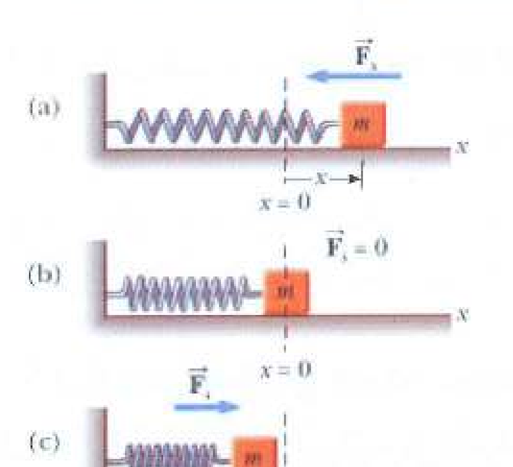
حيث k ثابت النابض. إن أي حركة تخضع لقانون قوة وفق المعادلة (15.1) تسمى حركة توافقية بسيطة، لأسباب سنشرحها لاحقاً.

بتطبيق قانون نيوتن الثاني، مع إهمال الاحتكاك واعتبار أن الحركة مستقيمة وفق المحور x، لدينا:

$$F = ma = -kx \qquad (15.2)$$

$$a = -\frac{k}{m}x = -\omega^2 x \qquad (15.3)$$

حيث افترضنا $\omega^2 = \frac{k}{m}$ أو $k = m\omega^2$ (15.4)



الشكل 15.1. كتلة مرتبطة بنابض، عندما تنزاح الكتلة إلى اليمين تكون القوة التي يطبقها النابض عليها إلى اليسار، وعندما تكون الكتلة في وضع التوازن تكون القوة المطبقة عليها مساوية الصفر، وعندما تنزاح إلى اليسار تكون القوة المطبقة عليها نحو اليمين.

نلاحظ أن التسارع a غير منتظم ويتناسب مع الإزاحة x.

يمكن كتابة المعادلة 15.2 بالشكل:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = -kx \quad \text{أو} \quad \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \qquad (15.5)$$

وهي معادلة تفاضلية حلها من الشكل:

$$x = A\cos(\omega t + \phi) \qquad (15.6)$$

تدعى الكمية $(\omega t + \phi)$ زاوية طور phase الحركة الاهتزازية، ومِنْ ثَمَّ يمثل ϕ الطور الابتدائي، أي قيمة الطور في اللحظة $t = 0$. يمكن أيضاً كتابة الحل بصيغة الجيب sin، والفارق الوحيد بين هاتين الصيغتين هو فرق في الطور الابتدائي قدره $\pi/2$، أي يتعين فرق الطور بتعيين الشروط الابتدائية التي قد تكون إزاحة ابتدائية أو سرعة ابتدائية.

ولما كان التابع $(\cos)$ أو $(\sin)$ يتغير بين 1- و 1+، فإن إزاحة الكتلة تتغير بين $x = -A$ و $x = +A$. تعرّف الإزاحة العظمى A، انطلاقاً من مبدأ الإحداثيات، بأنها سعة الحركة الجيبية أو مطالها Amplitude، وتتكرر قيم تابع الـ sin نفسها كل مرة تزداد فيها الزاوية بمقدار 2π، إذن تتكرر إزاحة الكتلة بعد مجال زمني قدره $2\pi/\omega$. ومِنْ ثَمَّ فإن الحركة الجيبية دورية ودورها هو $T = 2\pi/\omega$، وتواتر الحركة الجيبية f يساوي عدد الاهتزازات الكاملة في واحدة الزمن، إذن $f = 1/T$. وهي حركة بسيطة توصف بتواتر وحيد(التوافقي الأول) وبتابع وحيد .

تدعى الكمية ω النبض (أو التواتر الزاوي Angular Frequency) للكتلة المهتزة، وهو يرتبط بالتواتر (العادي) بعلاقة مماثلة لما في الحركة الدائرية، أي:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \qquad (15.7)$$

نستنتج سرعة الكتلة Velocity في هذه الحركة باشتقاق المعادلة (15.6):

$$u = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \phi) \quad (15.8)$$
حيث يمثل ωA سعة سرعة الحركة الاهتزازية $u_M = \omega A$

وبالمثل يعطى التسارع Acceleration بالعلاقة:

$$a = \frac{du}{dt} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi) = -\omega^2 x \quad (15.9)$$

التي تدل على أن التسارع يتغير دورياً بين القيمتين $+\omega^2 A$ و $-\omega^2 A$ في الحركة الجيبية وهو يتناسب دوماً مع الإزاحة ويعاكسها، ويلاحظ تحقق المعادلة التفاضلية.

15.3. القوة والطاقة في الحركة الجيبية

تدل المعادلة (15.2) على أن القوة، في الحركة الجيبية، تتناسب طردياً مع الإزاحة وتعاكسها في الاتجاه، ومِنْ ثَمَّ تتجه القوة دائماً نحو مبدأ الإحداثيات O الذي يمثل موضع التوازن، لأنه عند $x = 0$ يكون $F = 0$. يمكن القول أيضاً إن القوة F مركزية وجاذبة حيث تمثل النقطة O مركز الجذب. تعدّ القوة الممثلة بالمعادلة (15.2) نموذجاً للقوة التي تظهر حين نحدث تشوُّهاً في جسمٍ مرن كالنابض. يدعى الثابت $k = m\omega^2$، أحياناً ثابت مرونة النابض Elastic constant، ويتعلق بثوابت مرونة المادة التي صنع منها، وهو يمثل القوة اللازمة لإزاحة الجسيم بقدر واحدة المسافة. ويمكن بضم المعادلتين (15.4) و(15.7) أن نكتب العلاقتين:

$$\text{(a)}\ f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{و} \quad \text{(b)}\ T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (15.10)$$

اللتين تعبران عن دور حركة الجسيم الجيبية وتواترها بدلالة كل من كتلته وثابت مرونة النابض.

يمكن التعبير عن الطاقة الحركية Kinetic Energy للجسيم على النحو

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \phi) \quad (15.11)$$

يمكن أيضاً التعبير عن الطاقة الحركية بالشكل التالي:

$$K = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2\left[1 - \cos^2(\omega t + \phi)\right]$$

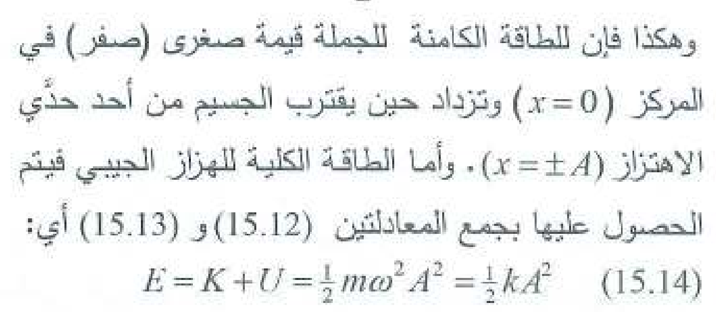
التي يمكن أن تكتب على النحو:

$$K = \tfrac{1}{2}k(A^2 - x^2) \quad \text{أو} \quad K = \tfrac{1}{2}m\omega^2(A^2 - x^2) \quad (15.12)$$

نلاحظ أن الطاقة الحركية في الحركة الجيبية تكون عظمى في المركز $(x = 0)$ وصفراً عند نهايتي الاهتزازة $(x = \pm A)$.

يقابل طاقة الجسيم الحركية طاقة كامنة U لجملة الكتلة والنابض، إذ تشير العلاقة (15.2) إلى أن القوة مشتقة من كمون $U(x)=-\int Fdx$. وبإجراء التكامل (واختيار صفر الطاقة الكامنة في المبدأ أو في موضع التوازن) نحصل على:

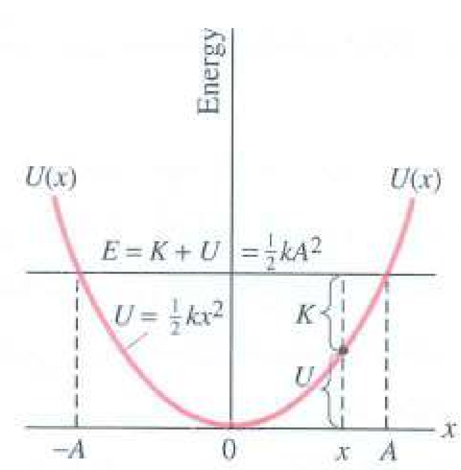
$$U(x)=\tfrac{1}{2}kx^2=\tfrac{1}{2}m\omega^2x^2 \text{ أو } U(x)=\frac{1}{2}kx^2 \qquad (15.13)$$



وهكذا فإن للطاقة الكامنة للجملة قيمة صغرى (صفر) في المركز ($x=0$) وتزداد حين يقترب الجسيم من أحد حدَّي الاهتزاز ($x=\pm A$). وأما الطاقة الكلية للهزاز الجيبي فيتم الحصول عليها بجمع المعادلتين (15.12) و (15.13) أي:

$$E=K+U=\tfrac{1}{2}m\omega^2A^2=\tfrac{1}{2}kA^2 \qquad (15.14)$$

وهي كمية ثابتة (الشكل15.12).. وعلى هذا يمكننا القول إنه يحدث، في أثناء اهتزاز الكتلة، تبادل مستمر بين طاقتيها الكامنة والحركية. فعندما تبتعد الكتلة عن موضع توازنها تزداد طاقتها الكامنة على حساب طاقتها الحركية، ويحصل العكس عندما تعود نحو موضع توازنها. لاحظ أن الطاقة الكلية لهزاز معين تتناسب طردياً مع مربع سعته. ولهذا عدة نتائج عملية سنراها لاحقاً.



الشكل15.2. علاقات الطاقة في الحركة الجيبية. الطاقة الكامنة U. الطاقة الحركية K، والطاقة الكلية $E=U+K$.

تُمثل في الشكل (15.2) الطاقة الكامنة $U(x)=\tfrac{1}{2}kx^2$ بقطع مكافئ. ففي حالة طاقة كلية معينة E، ممثلة بالمستقيم الأفقي، تتعين إزاحتا الاهتزاز الحديتان بفاصلتي تقاطع هذا المستقيم مع منحني الطاقة الكامنة. ولما كان القطع المكافئ متناظراً، وقع حدّا الاهتزاز عند بعدين متساويين $\pm A$ من O. تعطى الطاقة الحركية K، في أي نقطة x، بفارق الطاقة بين المنحني $U(x)$ والمستقيم E.

ثانياً: الحركات الموجية

15.4. مقدمة

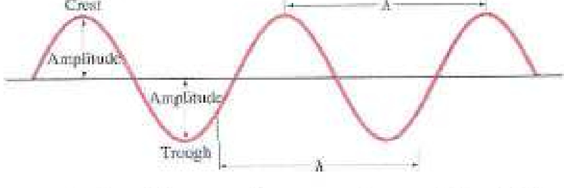
نميز بين نوعين مهمين من الأمواج 1) الأمواج الطولانية أو الأمواج الضغطية pressure waves أو الأمواج الانضغاطية compression waves التي تنتمي لها الأمواج الصوتية المستخدمة في الإيكوغرافي (تصوير الصدى Echography)، 2) والأمواج العرضانية أو أمواج القص shear waves التي تستخدم في جس النسج وتشخيص الأورام فيها. يمكن لهذين النوعين من الأمواج أن ينتشرا في جسم صُلْب؛ لأنه يمكن للذرات والجزيئات الثابتة نسبياً أن تهتز حول مواقعها في أي اتجاه. غير أنَّه لا يمكن أن ينتشر في

الموائع إلّا الأمواج الطولانية فقط، لأن أي حركة عرضانية لن تخضع لأي قوة إرجاع بسبب سهولة تشوُّه المائع القصّية.

15.5. خصائص الحركة الموجية

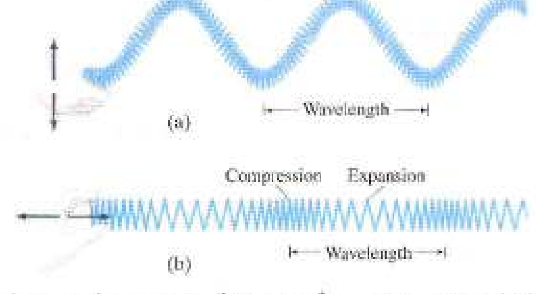
عندما تنتشر الحركة الاهتزازية في وسط فإنها تشكل حركة موجية. يبين الشكل15.3 بعض الكميات المهمة التي تستخدم في وصف الحركة الدورية الموجية. يلاحظ أولاً أن الشكل يميز إزاحات مختلفة لنقاط في وسط مستمر، وقد تتغير هذه الإزاحات بين لحظة وأخرى، لذلك يمكن أن تمثل الموجة مكانياً أو زمانياً. تدعى النقاط العالية على الموجة الذُّرا، في حين تدعى النقاط المنخفضة القيعان. أما السعة A فهي الارتفاع الأعظمي للذروة أو عمق القاع بالنسبة للمستوى الطبيعي (أو التوازن). وتساوي الإزاحة الكلية من الذروة إلى القاع ضعف السعة العظمى. في حين أن البعد بين ذروتين متتاليتين، في التمثيل المكاني، يدعى الطول الموجي λ (الحرف اليوناني لمدا). كما أن الطول الموجي يساوي أيضاً البعد بين أي نقطتين متماثلتين على الموجة. والتواتر f هو عدد الذُّرا أو الدورات الكاملة التي تمر بها نقطة معينة في واحدة الزمن. الدور، وهو مقلوب التواتر، في التمثيل الزماني هو الزمن المستغرق بين ذروتين متتاليتين تمران بالنقطة نفسها في الفضاء.

15.6. أنواع الأمواج: العرضانية والطولانية



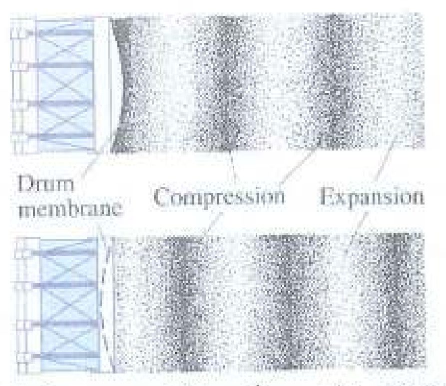
الشكل15.3. خصائص موجة مستمرة أحادية التواتر تنتشر وفق المحور x.

عندما تنتشر موجة في نابض أو وتر، وليكن من اليسار إلى اليمين كما في الشكل15.4a، تهتز جسيمات الوتر (حلقات النابض في هذه الحالة) إلى الأعلى وإلى الأسفل في اتجاه عرضاني بالنسبة إلى حركة الموجة تدعى هذه الموجة عرضانية transverse. يوجد نوع آخر للموجة يعرف بالموجة الطولانية longitudinal، وهي التي يكون اهتزاز جسيمات الوسط (لفّات النابض) في اتجاه حركة الموجة. تتشكل الأمواج الطولانية بسهولة في نابض بتناوب ضغط وإطالة إحدى نهايتيه (الشكل15.4b). فتنتشر في النابض سلسلة من الانضغاطات compressions والتخلخلات expansions. والانضغاطات هي تلك المناطق التي تكون اللفات فيها مؤقتاً متقاربة فيما بينها (أصغر من التباعدات في حالة التوازن).



الشكل15.4. (a) موجة عرضانية، (b) موجة طولانية.

والتخلخلات هي تلك المناطق التي تكون اللفات فيها مؤقتاً متباعدة فيما بينها. إن التضاغطات والتخلخلات تقابل ذرا وقيعان موجة عرضانية. من الأمثلة المهمة على الموجة الطولانية، الموجة الصوتية في الهواء.



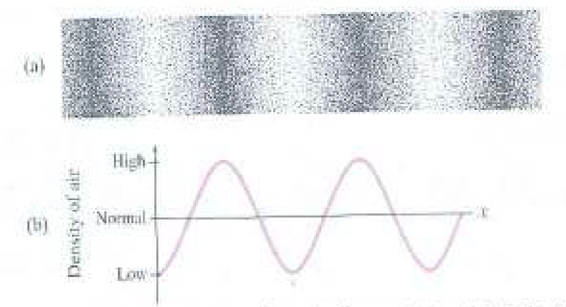
الشكل15.5. توليد موجة صوتية، وهي موجة طولانية، تظهر الموجة الطولانية على الشكل في لحظتين زمنيتين يفصل بينهما نصف الدور T/2.

إذ إن جلدة طبل مهتزة تضغط الهواء الملامس لها وتخلخله على التناوب، مولدة أمواجاً طولانية في الهواء تخرج منها على النحو المبين في الشكل15.5.

إن كل مقطع من الوسط تعبره موجة طولانية يهتز، كما هو الحال في الأمواج العرضانية، على مسافة صغيرة جداً، في حين يمكن للموجة نفسها أن تنتشر مسافات كبيرة. لكل من الطول الموجي والتواتر وسرعة الموجة معنى في الموجة الطولانية أيضاً. فالطول الموجي هو البعد بين انضغاطين متتاليين (أو البعد بين تخلخلين متتاليين)، والتواتر هو عدد الانضغاطات التي تمر في نقطة معينة في الثانية. وأما سرعة الموجة فهي السرعة التي يبدو أن كل انضغاط ينتقل بها؛ وهي تساوي حاصل ضرب الطول الموجي بالتواتر.

$$v = \lambda f \qquad (15.15)$$

يمكن تمثيل الموجة الطولانية بيانياً برسم كثافة جزيئات الهواء (أو لفات النابض) بدلالة الموقع في لحظة معينة، كما هو مبين في الشكل15.6. إذ إن مثل هذا التمثيل البياني يسهل إيضاح ما يحدث. لاحظ أن التمثيل البياني يشبه كثيراً موجة عرضانية جيبية.



الشكل15.6. (a) موجة طولانية و(b) تمثيلها البياني في لحظة معينة.

15.6.1. سرعة الأمواج العرضانية في وتر

يمكن كتابة معادلة تفاضلية لعنصر من الوسط مستمدة من قانون نيوتن الثاني، ثم حلّها لاستنتاج سرعة الانتشار لنجد أنها تعتمد على خصائص الوسط الذي تنتشر فيه وعلى القوة المطبقة المتمثلة بالإجهاد الذي يمكن التعبير عنه بدلالة إزاحة (الانفعال) وثابت المرونة المناسب. فسرعة موجة

عرضانية على وتر مشدود مثلاً تعتمد على توتر (أو شدّ) tension الوتر F_T وعلى كتلته الخطية μ (حيث $\mu = m/\ell$ ، تظهر الحاجة لتعريفها؛ لأننا ندرس عنصر متناهي الصغر عند تطبيق قانون نيوتن).

وفي حالة الأمواج الصغيرة السعة تكون العلاقة:

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} \tag{15.16}$$

يلاحظ أنه بقدر ما تكون الكتلة الخطية للوتر أكبر تكون سرعة انتشار الموجة أبطأ.

15.6.2. سرعة الأمواج الطولانية والعرضانية في النسج

لأهمية سرعة انتشار كل من الأمواج الضغطية (الأمواج الصوتية) وأمواج المرونة والأمواج القصية في النسج التي ستبرز لاحقاً لدى تصوير النسج بالأمواج فوق الصوتية Ultrasonography فلا بد من إلقاء الضوء على علاقتها بعوامل المرونة الموافقة. ويجدر بالذكر أن العلاقة العامة لسرعة هذه الأمواج تشبه كثيراً حالة الموجة العرضانية على وتر (المعادلة 15.16)؛ أي تتعلق بعامل مرونة وعامل عطالة:

$$v = \sqrt{\frac{elastic\ force\ factor}{inertia\ factor}}$$

ففي حالة موجة مرونة طولانية تنتشر في قضيب صلب أو وتر طويل تعطى سرعتها بالعلاقة:

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \tag{15.17}$$

حيث Y عامل مرونة المادة elastic modulus أو عامل يانغ (المرتبط بالتمدد أو التقلص)، و ρ كتلة واحدة الحجوم. وفي حالة موجة طولانية كالموجة الصوتية (يقال أيضاً موجة ضغطية) تنتشر في مائع (سائل أو غاز) تعطى سرعتها بالعلاقة:

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{15.18}$$

حيث B عامل المرونة الحجمي bulk modulus .و يمكن كتابة العلاقة (15.18) بالشكل:

$B = \rho v^2$ أو $\frac{B}{v} = \rho v$ ، حيث ρv تمثل ممانعة الوسط الصوتيةZ، وتكتب بالشكل:

$$Z = \rho v \tag{15.18'}$$

يردُّ سبب التسمية هذا إلى التشابه بين التيار الكهربائي والسرعة من جهة والكمون الكهربائي والقوة من جهة ثانية.

أما في حالة موجة قصّية، وهي موجة عرضانية، في وسط صلب:

$$v_s = \sqrt{\frac{S}{\rho}} \tag{15.19}$$

حيث S عامل القص shear modulus ويعبر عن قساوة النسيج. ولتغير هذا العامل تبعاً للحالة المرضية للنسيج فيمكن الاعتماد عليه في تشخيص الأورام التي تغدو أقل مرونة من النسج السليمة، وذلك بوسم الأمواج فوق الصوتية بموجة قص في تصوير الصدى (الإيكوغرافي).

مثال15.1. تحديد موقع الصدى. إن تحديد موقع الصدى شكل من الإدراك الحسي تستخدمه حيوانات كالخُفاش والحيتان والدلافين. إذْ يصدر الحيوان نبضة صوتية (موجة طولانية) يكشف عنها بعد انعكاسها عن الأجسام، ومن المدة الزمنية والسرعة يتحدد الموقع. يقدر تواتر الأمواج التي يصدرها حيوان البحر بنحو 100kHz. (a) ما طول الموجة التي يصدرها؟ (b) إذا وقع حاجز على بعد 100m من الحيوان، فما اللحظة التي يكشف فيها الحيوان عن صدى الموجة التي يصدرها؟ علماً أن معامل المرونة الحجمي $2.0\times10^{9}N/m^{2}$ لماء البحر وكتلته الحجمية $1.025\times10^{3}kg/m^{3}$.

الحل. نحسب في بادئ الأمر سرعة الأمواج الطولانية باستخدام المعادلة (15.18). ثم يحسب الطول الموجي من العلاقة: $\lambda=v/f$. (a) سرعة الأمواج الطولانية في ماء البحر الأعلى كثافة بقليل من الماء النقي:

$$v=\sqrt{\frac{B}{\rho}}=\sqrt{\frac{2.0\times10^{9}N/m^{2}}{1.025\times10^{3}kg/m^{3}}}=1.4\times10^{3}m/s$$

وباستخدام المعادلة (15.15) نحصل على:

$$\lambda=\frac{v}{f}=\frac{(1.4\times10^{3}m/s)}{(1.0\times10^{5}Hz)}=14mm$$

(b) الزمن الذي تستغرقه الجولة بين الحيوان والجسم يساوي:

$$t=\frac{\text{distance}}{\text{speed}}=\frac{2(100m)}{1.4\times10^{3}m/s}=0.14s$$

ملاحظة. سنرى أنه لا يمكن استخدام الأمواج في الكشف عن الأجسام بوضوح إلاّ إذا كان الطول الموجي من مرتبة أبعاد الجسم أو أصغر منها، وذلك لأن الأمواج الصوتية كالأمواج الكهرطيسية تخضع لانعراج وتداخل. ويمكن للدلفين الكشف عن أجسام من مرتبة السنتمتر أو تزيد.

وسنرى كذلك أن الأمواج التي تنتشر في خط في بعد واحد كالأمواج العرضانية على وتر مشدود، أو الأمواج الطولانية في قضيب أو أنبوب مملوء بمائع هي أمواج خطية أو أحادية البعد، معادلة انتشارها سهلة نسبياً. في حين أن الأمواج السطحية كالأمواج المائية هي أمواج ثنائية البعد تكون معادلة انتشارها في بعدين وهي أعقد من السابقة. أخيراً إن الأمواج التي تنطلق من منبع في جميع الاتجاهات، كالصوت

الصادر من مكبر للصوت أو أمواج الهزة الأرضية من خلال الأرض هي أمواج ثلاثية الأبعاد، معادلتها معقدة إلّا إذا كان الانتشار متماثل المناحي.

15.7. طاقة الأمواج

تحمل الأمواج الطاقة من مكان إلى آخر. فعندما تنتشر الأمواج في الوسط نفسه أو من وسط إلى آخر، تنتقل الطاقة على شكل طاقة اهتزازية من جسيم إلى آخر في الوسط. وفي حالة موجة جيبية تواترها f تتحرك الجسيمات حركة توافقية بسيطة (الفقرة 15.3) لدى عبور موجة معينة، بطاقة تساوي $E=\frac{1}{2}kA^2$، حيث A الإزاحة العظمى أو سعة حركتها، إما بشكل عرضاني وإمّا طولاني (المعادلة 15.14). نستطيع باستخدام المعادلة 15.10 أن نكتب $k=4\pi^2 mf^2$، حيث m كتلة جسيم (أو حجم صغير) من الوسط. ومِنْ ثَمّ نحصل بدلالة التواتر والسعة على:

$$E=\frac{1}{2}kA^2=2\pi^2 mf^2A^2$$

في حالة موجة ثلاثية الأبعاد تنتشر في وسط مرن، تكون الكتلة $m=\rho V$، حيث ρ كثافة الوسط و V حجم شريحة صغيرة من الوسط. والحجم يساوي $V=S\ell$، حيث S مساحة المقطع الذي تنتشر الموجة من خلاله (الشكل15.7)، ويمكن أن نكتب ℓ بأنها المسافة التي تنتقلها الموجة خلال الفاصل الزمني t بالشكل: $\ell=vt$، حيث v سرعة الموجة.

$$E=2\pi^2\rho Svt f^2A^2 \qquad (15.20)$$



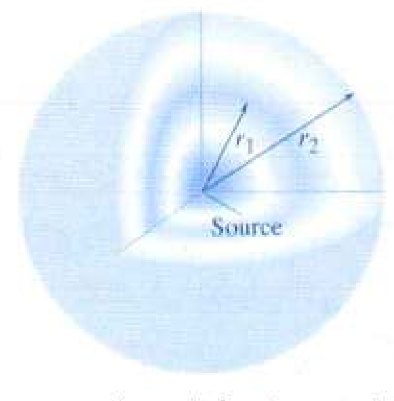
الشكل15.7. حساب الطاقة المحمولة بموجة تنتشر بالسرعة v.

نحصل من هذه المعادلة على نتيجة مهمة، وهي أن الطاقة التي تحملها موجة معينة تتناسب طردياً مع مربع سعتها ومع مربع التواتر. وأما المعدل الوسطي للطاقة التي تحملها فهو الاستطاعة المتوسطة:

$$\overline{P}=\frac{E}{t}=2\pi^2\rho Sv f^2A^2 \qquad 15.21)$$

أخيراً تعرف شدة موجة I intensity بأنها الاستطاعة المتوسطة التي تحملها الموجة في واحدة المساحة عمودياً على منحى تدفق الطاقة:

$$I=\frac{\overline{P}}{S}=2\pi^2\rho v f^2A^2 \qquad (15.22)$$



الشكل15.8. الموجة التي تنطلق من منبع نقطي كروية الشكل. تظهر على الشكل ذروتان مختلفتان (أو انضغاطان)، نصفا قطريهما r_1 و r_2.

إذا كانت الموجة تنطلق من منبع في جميع مناحي الفراغ، تكون الموجة ثلاثية الأبعاد. من الأمثلة على ذلك انتشار الصوت في الهواء الطلق، وأمواج الهزات الأرضية والأمواج الضوئية. إذا كان

الوسط متماثل المناحي (أي إنه متجانس وسرعة انتشار الأمواج نفسها في جميع الاتجاهات)، تكون الموجة من منبع نقطي موجة كروية (الشكل15.8). عندما تتجه الموجة نحو الخارج تتوزع طاقتها على سطح أكبر فأكبر، ومِنْ ثَمَّ فإن شدة الموجة هي:

$$I = \frac{\overline{P}}{S} = \frac{\overline{P}}{4\pi r^2}$$

نرى أنه إذا كانت استطاعة الخرج $\overline{P}$ ثابتة، تتناسب الشدة عكسياً مع مربع البعد (أي تنخفض مع مربع البعد) عن المنبع:

$$I \propto \frac{1}{r^2} \text{ (موجة كروية)} \qquad (15.23a)$$

إذا أخذنا نقطتين تبعدان r_1 و r_2 عن المنبع كما في الشكل15.8، تكون الشدة عند النقطة الأولى $I_1 = \overline{P}/4\pi r_1^2$ وعند النقطة الثانية $I_2 = \overline{P}/4\pi r_2^2$، ومِنْ ثَمَّ:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\overline{P}/4\pi r_2^2}{\overline{P}/4\pi r_1^2} = \frac{r_1^2}{r_2^2} \qquad (15.23b)$$

وهكذا تنخفض الشدة إلى ربع قيمتها السابقة $I_2/I_1 = \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{4}$ عندما يتضاعف البعد $(r_2/r_1 = 2)$.

كما يجب أن تتناقص السعة مع $1/r$ ومن ثم:

$$A \propto \frac{1}{r}$$

ولرؤية ذلك مباشرة من المعادلة 15.21، نأخذ ثانية بعدين مختلفين عن المنبع r_1 و r_2. في حالة خرج ثابت للاستطاعة، $S_1A_1^2 = S_2A_2^2$، حيث A_1 و A_2 سعتا الموجة عند r_1 و r_2 على الترتيب. ولما كان $S_1 = 4\pi r_1^2$ و $S_2 = 4\pi r_2^2$، كان لدينا $A_1^2 r_1^2 = A_2^2 r_2^2$ أو:

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{r_1}{r_2}$$

عندما يتضاعف بعد الموجة عن المنبع تنخفض سعتها إلى النصف، وهكذا (مع إهمال التخامد الناجم عن الاحتكاك).

مثال15.2. شدة الهزة الأرضية. تبلغ شدة موجة هزة أرضية تنتشر في الأرض $I = 1.0\times10^6 W/m^2$ عندما يكشف عنها على بعد $100km$ من المنبع، فما شدة تلك الموجة لدى الكشف عنها على بعد $400km$ من المنبع؟ نفترض بأن الموجة كروية، ومِنْ ثَمَّ تنخفض شدتها مع مربع البعد عن المنبع.

الحل. عند $400km$ يكون البعد أكبر بأربع مرات منه عند $100km$، ومِنْ ثَمَّ تكون الشدة $\left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16}$ من قيمتها عند البعد $100km$، أو: $(1.0\times10^6 W/m^2)/16 = 6.3\times10^4 W/m^2$

ملاحظة. باستخدام المعادلة 15.23b نحصل على القيمة نفسها:

$$I_2 = I_1 r_1^2 / r_2^2 = (1.0\times10^6 W/m^2)(100\,km)^2/(400\,km)^2$$

15.8. التمثيل الرياضي لموجة متقدّمة

لندرس الآن موجة متقدمة أحادية البعد وفق المحور x. يمكن أن تكون هذه الموجة عرضانية في وتر أو طولانية في قضيب أو في أنبوب ممتلئ بمائع. ولنفترض أن شكل الموجة جيبي ولها طول موجي وتواتر محددان. لنفرض أن شكل الموجة في اللحظة $t=0$ يعطى بالعلاقة:

$$D(x) = A\sin\frac{2\pi}{\lambda}x \qquad (15.24)$$

على النحو الذي يبينه المنحني المستمر في الشكل15.9. $D(x)$ هو الانزياح الذي تسببه الموجة Displacement (سواء كانت موجة طولانية أم عرضانية) في الموقع x و A سعة الموجة (الإزاحة العظمى). تعطي هذه العلاقة شكلاً يكرر نفسه كل طول موجي، ضروري لتكون الإزاحة نفسها عند $x=0$ و $x=\lambda$ و $x=2\lambda$، إلخ ...

الشكل15.9. موجة متقدّمة. تنتقل الموجة خلال الزمن t المسافة vt.

نفترض الآن أن الموجة تنتقل نحو اليمين بالسرعة v. إن كل جزء من الموجة بعد مرور زمن قدره t (عملياً كامل شكل الموجة) يكون قد انتقل إلى اليمين المسافة vt (المنحني المنقط في الشكل15.9). لنعتبر أي نقطة على الموجة في اللحظة $t=0$، والتي هي ذروة في موضع ما x. بعد زمن t تكون الذروة قد تقدمت مسافة vt ومِنْ ثَمَّ فإن موقعها الجديد يبعد بمقدار vt عن موقعها القديم. ولوصف هذه النقطة نفسها على الشكل الموجي، لا بد أن تكون حاكمة التابع الجيبي نفسها، ومِنْ ثَمَّ نستبدل $(x-vt)$ بـ x في المعادلة (15.24):

$$D(x,t) = A\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x-vt)\right] \qquad (15.25a)$$

وبعبارة أخرى، إذا كنت تمتطي ذروة، فإن حاكمة التابع الجيبي $(2\pi/\lambda)(x-vt)$، تظل كما هي $(\ldots=\pi/2, 5\pi/2)$؛ فعندما يتزايد t لا بد أن يزداد x بالمعدل نفسه ومِنْ ثَمَّ يظل $(x-vt)$ كما هو.

تعد المعادلة (15.25a) التمثيل الرياضي لموجة جيبية متقدمة وفق المحور x نحو اليمين (x متزايد). فهي تعطي إزاحة $D(x,t)$ الموجة في أي نقطة x يقع عليها الخيار، وفي أي لحظة t. يصف التابع $D(x,t)$ منحنياً يمثل الشكل الفعلي للموجة في الفراغ في اللحظة t. ولما كان $v=\lambda f$ يمكننا كتابة المعادلة (15.25a) بطرائق أخرى غالباً لتلائم مسائل أخرى:

$$D(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \qquad (15.25b)$$

حيث $T = 1/f = \lambda/v$ الدور؛ و:

$$D(x,t) = A\sin(kx - \omega t) \qquad (15.25c)$$

حيث $\omega = 2\pi f = 2\pi / T$ التواتر الزاوي الذي يعبر عن الدورية الزمانية و $k = 2\pi / \lambda$ العدد الموجي wave number الذي يعبر عن الدورية المكانية. (يجب عدم الخلط بينه وبين k الذي يمثل ثابت النابض). تعد الأشكال الثلاثة للمعادلة 15.25a,b,c متكافئة؛ ولو أن المعادلة 15.25c أبسطها للكتابة وربما أكثرها شيوعاً. تدعى الكمية $(kx-\omega t)$ ومكافئاتها في المعادلتين الأخريين طور الموجة.

يمكن التحقق من أن الإزاحة المعطاة وفق أحد الأشكال الثلاثة هي حل لمعادلة تفاضلية تشبه المعادلة (15.5) لمهتز توافقي وذلك باستعمال المشتقات الجزئية مرة بالنسبة للزمن ومرة بالنسبة للمكان فنجد:

$\partial^2 D / dt^2 = -\omega^2 A\sin(kx-\omega t)$ و $\partial^2 D / dx^2 = -k^2 A\sin(kx-\omega t)$ ومِنْ ثَمَّ:

$$(\partial^2 D / dt^2) / \omega^2 = (\partial^2 D / dx^2) / k^2$$

غالباً ما تدعى سرعة الموجة v سرعة الطور Phase velocity، لأنها تصف سرعة طور (شكل) الموجة ويمكن كتابتها بدلالة كل من ω و k على النحو:

$$v = \lambda f = \left(\frac{2\pi}{k}\right)\left(\frac{\omega}{2\pi}\right) = \frac{\omega}{k} \qquad (15.26)$$

أما في حالة موجة متقدمة إلى اليسار وفق المحور x (قيم x متناقصة)، نبدأ ثانية بالمعادلة 15.24 ونلاحظ أن السرعة في هذه الحالة $-v$. ثمة نقطة معينة على الموجة تغير موقعها بالمقدار $-vt$ خلال الزمن t، ومِنْ ثَمَّ يجب أن يحل $(x+vt)$ محل x في المعادلة 15.24. ومِنْ ثَمَّ في حالة موجة متقدمة إلى اليسار بسرعة v نحصل:

$$D(x,t) = A\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x+vt)\right] \qquad (15.27a)$$

$$= A\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} + \frac{2\pi t}{T}\right) \qquad (15.27b)$$

$$= A\sin(kx + \omega t) \qquad (15.27c)$$

بتعبير آخر نستبدل بكل بساطة $-v$ بـ v في المعادلات 15.25a,b,c.

15.9. التمثيل الرياضي لأمواج الضغط

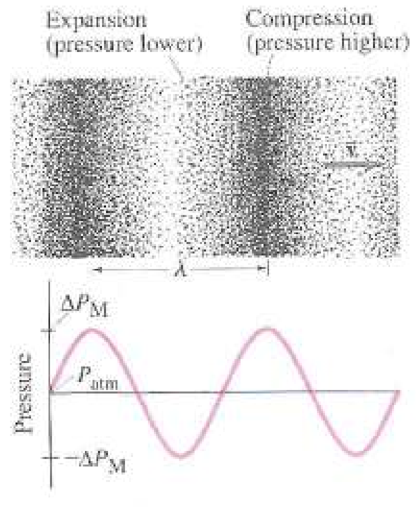
رأينا في الفقرة السابقة أنه يمكن تمثيل موجة جيبية أحادية البعد تنتشر وفق المحور x بالعلاقة (15.25c)

$$D = A\sin(kx - \omega t) \qquad (15.28)$$

حيث D إزاحة الموجة في الموضع x واللحظة t و A سعتها (قيمتها العظمى). يرتبط العدد الموجي k بالطول الموجي λ بالعلاقة $k = 2\pi / \lambda$ و $\omega = 2\pi f$، حيث f التواتر. في حالة موجة عرضانية،

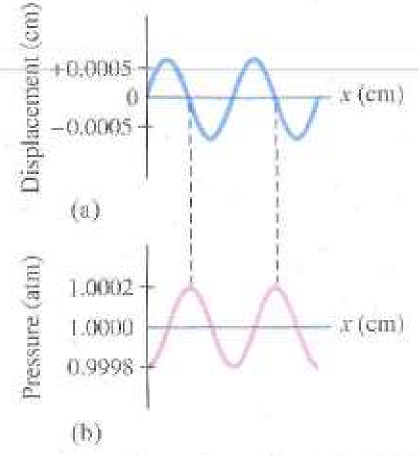
كالموجة في وتر، تكون الإزاحة D عمودية على اتجاه انتشار الموجة وفق المحور x. ولكن في حالة الموجة الطولانية تكون الإزاحة وفق اتجاه انتشار الموجة. أي إن الإزاحة تكون موازية لمحور الانتشار وتمثل إزاحة عنصر حجمي صغير من الوسط عن وضع توازنه.

طالما أن الأمواج هي اضطرابات تنتشر فيمكن دراسة الأمواج الطولانية (الصوتية) أيضاً من وجهة نظر اهتزازات(تغيرات) الضغط وليس اهتزاز(تغيرات الموقع) الإزاحة. تدعى الأمواج الطولية عملياً في أغلب الأحيان أمواج ضغطية pressure waves. إذ إن قياس تغيرات الضغط أسهل عادة من قياس



الشكل15.10. موجة صوتية طولانية تتجه نحو اليمين وتمثيلها البياني بدلالة الضغط.

تغيرات الإزاحة (انظر المثال15.6). وكما نرى في الشكل15.10 أن الضغط يكون أعلى عند انضغاط الموجة wave compression (حيث تكون الجزيئات أقرب ما يمكن بعضها إلى بعض) من القيمة الوسطية، بينما يكون الضغط في منطقة التمدد (التخلخل) أخفض من القيمة الوسطية. يبين الشكل15.11 تمثيلاً بيانياً للموجة الصوتية في الهواء بدلالة (a) الإزاحة و(b) الضغط. لاحظ أن موجة الإزاحة تختلف في الطور بمقدار ربع الطول الموجي أو $90° = \pi/2\text{rad}$ عن موجة الضغط: فعندما يكون الضغط في نهايته العظمى أو الصغرى تكون الإزاحة عن التوازن مساوية الصفر، وعندما يكون تغير الضغط مساوياً الصفر تكون الإزاحة في قيمتها العظمى أو الصغرى.



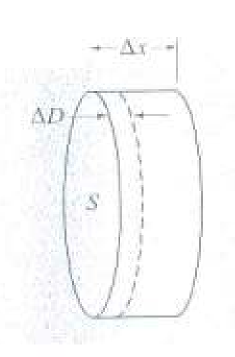
الشكل15.11. تمثيل موجة صوتية مكانياً في لحظة معينة بدلالة (a) الإزاحة (b) بدلالة الضغط.

15.10. اشتقاق موجة الضغط

نستنتج التمثيل الرياضي لتغير الضغط ΔP في موجة طولانية مسافرة متقدمة من تعريف المعامل الحجمي bulk modulus (العمود الأيمن من الجدول14.1): $\Delta P = B(\Delta\rho/\rho_0)$ أو: $\Delta P = -B(\Delta V/V)$، حيث ΔP فارق الضغط عن الضغط التوازني P_0 (عدم وجود موجة) و $\Delta V/V$ التغير النسبي في حجم الوسط بفعل تغير الضغطΔP. تعكس إشارة السالب حقيقة تناقص الحجم $(\Delta V < 0)$ لدى تزايد الضغط. ندرس الآن شريحة من مائع تمر فيها موجة طولانية

(الشكل15.12). إذا كانت ثخانة هذه الشريحة Δx ومساحتها S، فإن حجمها يساوي $V = S\Delta x$. يتغير الحجم نتيجة لتغير الضغط بمقدار $\Delta V = S\Delta D$، حيث ΔD التغير في ثخانة الشريحة لدى انضغاطها وتمددها (تذكر أن D يمثل انزياح الوسط). ومِنْ ثَمَّ لدينا:

$$\Delta P = -B\frac{S\,\Delta D}{S\,\Delta x} = -B\frac{\Delta D}{\Delta x}$$



الشكل15.12. موجة طولانية في مائع تتجه نحو اليمين. شريحة رقيقة من مائع في أسطوانة رقيقة مساحتها S، وثخانتها Δx، يتغير حجمها نتيجة لتغير الضغط لدى عبور الموجة. في اللحظة المبينة، يزداد الضغط عندما تنتقل الموجة نحو اليمين، ومِنْ ثَمَّ تنخفض ثخانة طبقتنا، بمقدار ΔD.

وفي الحسابات الدقيقة نأخذ النهاية $\Delta x \to 0$ فنحصل على:

$$dP = -B\frac{\partial D}{\partial x} \qquad (15.29)$$

حيث نستخدم رمز المشتق الجزئي نظراً لأن D تابع لكل من x و t. إذا كانت الإزاحة D جيبية (المعادلة 15.28) نجد من المعادلة15.29 أن:

$$dP = -(BAk)\cos(kx - \omega t) \qquad (15.30)$$

وهكذا يتغير الضغط جيبياً أيضاً، ولكنه يختلف في الطور عن الإزاحة بمقدار $90°$ أو ربع الطول الموجي كما في الشكل15.11. تدعى الكمية BAk سعة تغير الضغط، ΔP_M أو سعة الضغط الصوتي p_M.

وهي تمثل القيمتين العظمى والصغرى اللتين يختلف بهما الضغط عن الضغط التوازني المحيط. ومِنْ ثَمَّ يمكن أن نكتب:

$$\Delta P = -\Delta P_M \cos(kx - \omega t) \qquad (15.31)$$

باستخدام المعادلة (15.18) $v = \sqrt{B/\rho}$ والمعادلة (15.26) $k = \omega / v = 2\pi f / v$ نحصل على:

$$\Delta P_M = BAk = \rho v^2 Ak = 2\pi \rho v A f \qquad (15.32)$$

$$p_M = \rho v 2\pi f A \quad \text{أو} \quad p_M = 2\pi \rho v A f \qquad (15.32)'$$

وبالرجوع إلى المعادلتين (15.8) و'(15.18) يمكن كتابة المعادلة الأخيرة (الانتباه إلى رمز السرعة يوجد تداخل):

$$p_M = Z u_M \qquad (15.33)$$

حيث $Z = \rho(kg/m^3)v(m/s)$.

أي إن الضغط الصوتي في مائع (كالهواء) يساوي حاصل ضرب سرعة شرائح المائع u_M بالممانعة الصوتية للمائع Z مقدرة بالوحدة $kgm^{-2}s^{-1}$. ويعود سبب التسمية ممانعة لأنها تذكرنا بعلاقة سريان

تيار كهربائي في مقاومة كهربائية، أو ممانعة في الحالة العامة Z، يطبق فرق كمون كهربائي بين طرفيها:

$$V_M = ZI_M \tag{15.34}$$

فكما يؤدي فرق الكمون بين نقطتين إلى سريان التيار الكهربائي بينهما فإن فارق الضغط بين نقطتين، وهو الضغط الصوتي، يؤدي إلى انتشار موجة صوتية بينهما.

نذكّر هنا أن للممانعة الصوتية أهمية كبيرة في الإيكوغرافي الذي يعتمد على تسجيل الأصداء الواردة من السطوح الفاصلة بين نسيجين مختلفين بالممانعة الصوتية، حيث يكون معامل الانعكاس أكبر بقدر ما يكون الفارق بين الممانعتين أكبر. يدرج في الجدول 15.1 الممانعات المميزة لبضعة نسج مهمة من الناحية الطبية.

الجدول 15.1. الممانعات الصوتية لمختلف النسج

النسيج	الكتلة النوعية $kgm^{-3} \times 10^{-3}$	الممانعة المميزة $kgm^{-2}s^{-1} \times 10^{-6}$
الهواء	1.29	0.0004
الدم	1.06	1.62
الهيكل العظمي	1.38-1.81	3.75-7.38
الدماغ	1.03	1.55-1.65
الشحوم	0.92	1.35
الكليتان	1.04	1.62
الكبد	1.06	1.64-1.68
الرئتان	0.40	0.62
العضلات	1.07	1.65-1.74
الطحال	1.06	1.65-1.67
الماء	1.00	1.52

يجدر بالذكر أن العلاقة التي تربط بين الضغط الصوتي p_M وسعة الإزاحة تنبئنا بقيمة الضغط التي يجب عدم تجاوزها حتى لا تتجاوز الإزاحة A قيمة معينة عندما يتعلق الأمر بإزاحة في نسيج حيوي كغشاء الطبل في حالة الأمواج الصوتية المسموعة أو نسج الجنين في حالة الأمواج فوق الصوتية. ويمكننا في حالة قيمة معينة للضغط الصوتي المطبق على النسيج أن نقدر قيمة الإزاحة التي تحدث فيه بالشكل:

$$A = p_M / \rho v 2\pi f = p_M / \rho v\omega = p_M / Z\omega \tag{15.35}$$

15.11. شدة الموجة الصوتية

تعرّف شدة الموجة الصوتية بأنها الطاقة التي تحملها الموجة في وحدة الزمن في وحدة المساحة العمودية على جهة تدفق الطاقة. تتناسب الشدة كما رأينا (العلاقة 15.14)، طردياً مع مربع سعة الموجة. وللشدة واحدة الاستطاعة في وحدة المساحة، أو واط / المتر المربع ($watt/m^2$).

يجدر بالذكر أنه توجد علاقات لشدة الموجة الصوتية I في وسط معين تربطها بشكل مباشر، بكل من ضغط الموجة الصوتية p_M (الضغط الصوتي) والسرعة الاهتزازية لجزيئات الوسط u_M وممانعته تشبه كثيراً علاقات الاستطاعة الكهربائية P التي تربطها بالكمون الكهربائي V_M (الذي يقابل الضغط الصوتي

p_M في حالتنا) والتيار الكهربائي I_M الذي يقابل سرعة جزيئات الوسط u_M، والممانعة (المقاومة) الكهربائية Z (R) -التي تقابل الممانعة الصوتية Z.

بالرجوع إلى المعادلة (15.22) التي تربط بين شدة الموجة الصوتية $I = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2$ والمقادير التي ترتبط بها كالضغط الصوتي وسرعة جزيئات الوسط يمكننا دون اللجوء إلى الاستنتاج الرياضي كتابة مجموعة العلاقات الواردة في الجدول 15.2 للشدة الصوتية مع مقابلاتها للاستطاعة الكهربائية.

يمكن لأذن الإنسان أن تكشف أصواتاً شداتها منخفضة تصل إلى $10^{-12} W/m^2$، وعالية تصل إلى $1 W/m^2$ (حتى أعلى منها ولو أنها تكون مؤلمة)، وهو مجال للشدة واسع للغاية يمتد على اثنتي عشرة مرتبة أي 10^{12} مرتبة من الأخفض إلى الأعلى. ويرجّح أنه بسبب عرض هذا المجال لا نشعر بأن علوّ الصوت يتناسب طردياً مع الشدة، أي إن العلاقة بينهما ليست خطية، ويلجأ عادة إلى أخذ لغرتم الشدة. إذ إنه لتوليد صوت يبدو أنه أعلى مرتين يتطلب موجة صوتية شدتها أعلى بعشر أضعاف الشدة. يسري هذا الأمر عند أي مستوى للصوت في حالة التواترات القريبة من منتصف المجال السمعي.

الجدول 15.2. مقادير الخصائص الصوتية وما يقابلها من الخصائص الكهربائية

تسمية المقدار الكهربائي	الواحدة	المقابل الكهربائي	الواحدة	الرمز الصوتي	تسمية المقدار الصوتي
الكمون الكهربائي	Volt	V_M	N m^{-2}	p_M	الضغط الصوتي
التيار الكهربائي	Amp	I_M	m s^{-1}	u_M	سرعة جزيئات المادة
المقاومة الكهربائية	Ohm	$R = V_M / I_M$	kg m^{-2}s^{-1}	$Z = p_M / u_M$	الممانعة الصوتية
الاستطاعة الكهربائية	watt	P(Power)	Watt/m^2	I (Intensity)	شدة الموجة الصوتية
شكل1 للاستطاعة		$\frac{1}{2}\frac{V_M^2}{R}$		$\frac{1}{2}\frac{p_M^2}{Z}$	شكل1 لشدة الموجة
شكل2 للاستطاعة		$\frac{1}{2} R I_M^2$		$\frac{1}{2} Z u_M^2$	شكل2 لشدة الموجة
شكل3 للاستطاعة		$\frac{1}{2} I_M V_M$		$\frac{1}{2} u_M p_M$	شكل3 لشدة الموجة

15.12. المستوى الصوتي والوحدات اللغارتمية

نظراً للعلاقة بين الشعور الشخصي بعلوّ الصوت والكمية المقيسة فيزيائياً "الشدة" تتحدد مستويات الشدة Sound level عادة على سلم لغارتمي، وتقدّر بالبل Bell تخليداً لذكرى مخترع الهاتف Alexander Graham Bell أو بالديسيبل dB، التي تساوي عُشْر البل (الديسيبل) أي dB=1/10 Bell. يعرف المستوى الصوتي لأي صوت بدلالة شدته I على النحو:

$$\beta(dB) = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (15.36)$$

حيث $I_0 = 1.0\times10^{-12} W/m^2$ عتبة (السماع) الاستماع hearing threshold التي تعرَّف بأنها أخفض شدة تدركها الأذن السليمة، وهي الشدة التي تقابل المستوى المرجعي، ويؤخذ اللغارتم بالنسبة للأساس 10. وهكذا فإن المستوى الصوتي لصوت شدته $1.0\times10^{-10} W/m^2$ مثلاً يساوي:

$$\beta = 10\log\frac{1.0\times10^{-10} W/m^2}{1.0\times10^{-12} W/m^2} = 10\log 100 = 20dB$$

لاحظ أن المستوى الصوتي عند عتبة الاستماع $\beta = 10\log 10^{-12}/10^{-12} = 10\log 1 = 0dB$. لاحظ أيضاً أن زيادة الشدة بعامل قدره 10 يقابل زيادة في المستوى الصوتي قدرها $10dB$. وإن زيادة الشدة بعامل قدره 100 يقابل زيادة في مستوى الصوت قدرها $20dB$. ومِنْ ثَمَّ فإن صوتاً مستواه $50dB$ أشد 100 مرة من صوت مستواه $30dB$. تجد في الجدول 15.3 شدات الصوت ومستوياته لعدد من الأصوات الشائعة.

مثال15.3. شدة الصوت في الشارع: يبلغ المستوى الصوتي $75dB$ في منعطف شارع مزدحم. ما شدة الصوت هناك؟

الإجابة. يمكن بتذكر أن $I_0 = 1.0\times10^{-12} W/m^2$ الحصول على شدة الصوت بتطبيق المعادلة (15.36) من أجل الشدة I.

$$\log\frac{I}{I_0} = \frac{\beta}{10} \text{ ومِنْ ثَمَّ } \frac{I}{I_0} = 10^{\beta/10}$$

وفي حالة $\beta = 75dB$ نحصل:

$$I = I_0 10^{\beta/10} =$$

$$(1.0\times10^{-12} W/m^2)(10^{7.5}) = 3.2\times10^{-5} W/m^2$$

مثال15.4. استجابة مكبر الصوت. أعلن أن مكبر الصوت العالي الجودة يعيد إنتاج جميع التواترات من $30Hz$ إلى $18{,}000Hz$ وكل الشدات بمستوى صوتي متجانس $\pm3dB$. أي إن المستوى الصوتي لا يتغير خلال هذا المجال التواتري بأكثر من $3dB$ في حالة مستوى دخل معين. ما عامل تغير الشدة للتغير الأعظمي $3dB$ في المستوى الصوتي للخرج؟

الجدول 15.3. شدة الأصوات المختلفة

مصدر الصوت	مستوى الصوت dB	شدة الصوت watt/m²
طائرة نفاثة على ارتفاع 30m	140	100
عتبة الألم	120	1
حفلة رقص صاخبة	120	1
صافرة الشرطة على بعد 30m	100	1.0×10^{-2}
حركة مرور للشاحنات	90	1.0×10^{-3}
حركة مرور في شارع مزدحم	80	1.0×10^{-4}
مطعم مفعم بالضجيج	70	1.0×10^{-5}
حديث على بعد 50cm	65	3.0×10^{-6}
راديو هادئ	40	1.0×10^{-8}
الهمس	30	1.0×10^{-9}
حفيف الأوراق	10	1.0×10^{-11}
عتبة الاستماع	0	1.0×10^{-12}

الحل. نرمز للشدة الوسطية بـ I_1 ولمتوسط المستوى الصوتي بـ β_1. تقابل الشدة I_2 في هذه الحالة المستوى β_2. ثم نستخدم العلاقة بين الشدة والمستوى الصوتي.

$$\beta_2 - \beta_1 = 10\log\frac{I_2}{I_0} - 10\log\frac{I_1}{I_0}$$

$$3\text{dB} = 10\left(\log\frac{I_2}{I_0} - \log\frac{I_1}{I_0}\right) \quad = 10\log\frac{I_2}{I_1}$$

نظراً لأن $\log a - \log b = \log a/b$. تعطي المعادلة الأخيرة:

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{0.30} = 2.0 \quad \text{أو} \quad \log\frac{I_2}{I_1} = 0.30$$

ومِنْ ثَمَّ فإن $\pm 3dB$ تقابل ضعف الشدة أو نصفها حسب الإشارة المناسبة.

تجدر ملاحظة أن فارق المستوى الصوتي $3dB$ (الذي يقابل شدة مضاعفة كما رأينا للتو) لا يقابل إلّا تغيراً صغيراً جداً في الإحساس الشخصي لعلو ظاهري. لا يستطيع الإنسان العادي أن يميز عملياً إلاّ فرقاً في المستوى الصوتي يمتد من 1 إلى $2dB$.

تمرين B. إذا كانت زيادة العلو بمقدار $3dB$ تعني أشد بمرتين، فماذا تعني زيادة بمقدار $6dB$ ؟

مثال. عازفو البوق. عازف للبوق trumpet يؤدي معزوفة بمستوى صوتي قدره $75dB$. يلتحق به ثلاثة عازفي بوق بالعلو نفسه. فما المستوى الصوتي للمجموعة؟

الإجابة. إن شدة أربعة أبواق تساوي أربعة أضعاف شدة بوق واحد $(=I_1)$ أو $4I_1$. والمستوى الصوتي للأبواق الأربعة:

$$\beta = 10\log\frac{4I_1}{I_0} = 10\log 4 + 10\log\frac{I_1}{I_0}$$
$$= 6.0dB + 75dB = 81dB$$

تمرين. نرى من الجدول15.3 أن المحادثة العادية تقابل مستوى صوتياً قدره نحو $65dB$. فإذا كان شخصان يتحدثان في الوقت نفسه يكون المستوى الصوتي (a) $65dB$، (b) $68dB$، (c) $75dB$، (d) $130dB$، (e) $62dB$.

يتناقص علو الصوت أو شدته عادة لدى الابتعاد عن مصدر الصوت. يخف هذا المفعول في الحجرات الداخلية بسبب الانعكاسات عن الجدران. غير أنه إذا كان المنبع في جو مفتوح بحيث يمكن للصوت أن ينتشر بحرية في كل الاتجاهات، تتناقص الشدة عكساً مع مربع البعد $I \propto \frac{1}{r^2}$.

كما رأينا في الفقرة 15.7 أن الشدة تتناقص على مسافات كبيرة بأسرع من $1/r^2$ لتحول جزء من الطاقة إلى حركة غير منتظمة لجزيئات الهواء. يزيد هذا الضياع في حالة التواترات الأعلى ومِنْ ثَمَّ يكون الصوت أقل شدة عند بعد معين عندما يتضمن مزيجاً من التواترات.

15.13. علاقة شدة الموجة الصوتية بسعتها

تتناسب شدة موجة صوتية مع مربع سعة الموجة، كما رأينا في الفقرة 15.7. ومِنْ ثَمَّ نستطيع أن نربط السعة كمياً بالشدة I أو بالمستوى β، كما يظهر في المثال التالي.

مثال15.5. إيضاح صغر الإزاحات. (a) أوجد إزاحة جزيئات الهواء في حالة صوت تواتره $1000\,Hz$ عند عتبة الاستماع. (b) أوجد تغير الضغط الأعظمي في مثل هذه الموجة الصوتية.

الإجابة. تطبق العلاقة بين شدة موجة I وسعة الإزاحة A فيها (المعادلة15.22) لإيجاد سعة اهتزازات جزيئات الهواء، بمعرفة الشدة. يتم إيجاد الضغط من المعادلة '(32).

(a) عند عتبة الاستماع $I_0 = 1.0\times10^{-12}\,W/m^2$ (الجدول15.3) نحل المعادلة 15.22 لحساب السعة A.

$$A = \frac{1}{2\pi f} = \sqrt{\frac{I}{2\rho v}}$$

$$= \frac{1}{(3.14)(1.0\times10^3 s^{-1}} \sqrt{\frac{1.0\times10^{-12}\,W/m^2}{(2)(1.29\,kg/m^3)(343\,m/s)}} = 1.1\times10^{-11}\,m$$

حيث أخذنا كثافة الهواء $1.29\,kg/m^3$ وسرعة الصوت في الهواء $343\,m/s$ في الدرجة $20^\circ C$.

ملاحظة. نرى كيف أن أذن الإنسان حساسة للغاية، فهي تكشف إزاحات لجزيئات الهواء أقل من أقطار الذرات (نحو $10^{-10}\,m$).

(b) نتعامل الآن مع الصوت كموجة ضغط. لدينا من المعادلة '(15.32):

$$p_M = 2\pi\rho v A f$$
$$= 2\pi(1.29\,kg/m^3)(343\,m/s)(1.1\times10^{-11}\,m)(1.0\times10^3)$$
$$= 3.1\times10^{-5}\,Pa = 3.1\times10^{-11}\,atm$$

نرى ثانية أن أذن الإنسان حساسة للغاية لتغيرات الضغط.

ملاحظة. يمكن بالاعتماد على أشكال التعبير عن شدة الموجة الصوتية الواردة في الجدول 15.2 أن نعبر عن المستويات الصوتية بدلالة الضغط الصوتي أو سرعة جزيئات الوسط على النحو التالي:

$$\beta(dB)=10\log_{10}\frac{I}{I_0}=10\log_{10}\frac{\frac{1}{2}\frac{p_M^2}{Z}}{\frac{1}{2}\frac{p_0^2}{Z}}=10\log_{10}\frac{p_M^2}{p_0^2}=20\log_{10}\frac{p_M}{p_0} \quad (15.37)$$

أو بالشكل

$$\beta(dB)=10\log_{10}\frac{I}{I_0}=10\log_{10}\frac{\frac{1}{2}Zu_M^2}{\frac{1}{2}Zu_0^2}=10\log_{10}\frac{u_M^2}{u_0^2}=20\log_{10}\frac{u_M}{u_0} \quad (15.38)$$

يمكن اللجوء إلى أي من الشكلين وذلك تبعاً للبيانات المتوافرة.

15.14. تخامد شدة الموجة الصوتية في النسج

درسنا في الفقرة 15.7 التخامد المتعلق بالبعد عن المنبع النقطي (الهندسي) لشدة الموجة الصوتية والذي تحكمه العلاقة (15.23a,b). لكنه في حالة منبع مستوٍ يصدر أمواجاً متوازية نتوقع أن يكون تخامد الشدة مع البعد معدوماً تقريباً (شدة ثابتة)، مع ذلك يوجد تخامد لشدة الموجة الصوتية في النسج نتيجة تبعثرها أو تحولها إلى شكل آخر من أشكال الطاقة ،فإذا كانت شدتها الابتدائية I_0، قبل دخولها النسيج ستتخامد ويتناسب التخامد ΔI على بعد معين من سطح النسيج x (أي الفارق بين الشدة الابتدائية والشدة في ذلك الموضع) طردياً مع البعد ومع شدة الموجة الصوتية عند ذلك الموضع ويسمى ثابت التناسب μ ثابت التخامد للوسط الذي يتعلق بطبيعة النسيج أي نكتب:

$$\Delta I=-\mu I\Delta x$$

I_0

الشدة

$I=I_0\,e^{-\mu x}$ يعطي التكامل

I_0 الشدة الابتدائية

يدل اتجاه السهم على تناقص μ

البعـــد

الشكل 15.13.

بإجراء التكامل على مسار الحزمة نحصل على العلاقة التي تربط بين الشدة في كل نقطة من المسار والشدة الابتدائية بدلالة البعد

$$I=I_0e^{-\mu x} \quad (15.39)$$

يظهر في الشكل 15.13 رسم بياني لشدة الموجة الصوتية بدلالة البعد من أجل ثلاث قيم لثابت التخامد. يلاحظ على الشكل أنه بقدر ما يكون ثابت التخامد أكبر يكون تخامد الموجة أسرع. حيث يتبع تخامد الموجة منحنياً أسياً.

معامل التخامد. يتم التعبير عن التخامد عادة بالديسيبل dB. يعرف التغير بوحدات الديسيبل $\beta(dB)=10\log_{10}\frac{I}{I_0}$، ولكن التخامد في النسج شكل أسي $\frac{I}{I_0}=e^{-\mu x}$.

بتعويض علاقة التخامد الأسي في علاقة التخامد العشري نحصل على:

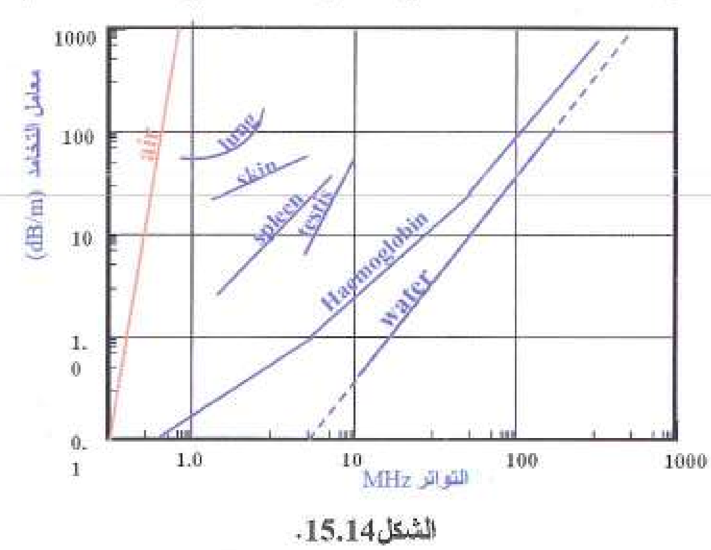
$$\log_{10}\frac{I}{I_0}=-\mu x*\log_{10}e$$

$$10\log_{10}\frac{I}{I_0}=-\mu x*10*\log_{10}e=-\mu x*4.343$$

فيكون معامل التخامد مقدراً بالوحدة dB/m

$$\alpha=4.343\,\mu(\mathrm{m}^{-1}) \qquad (15.40)$$

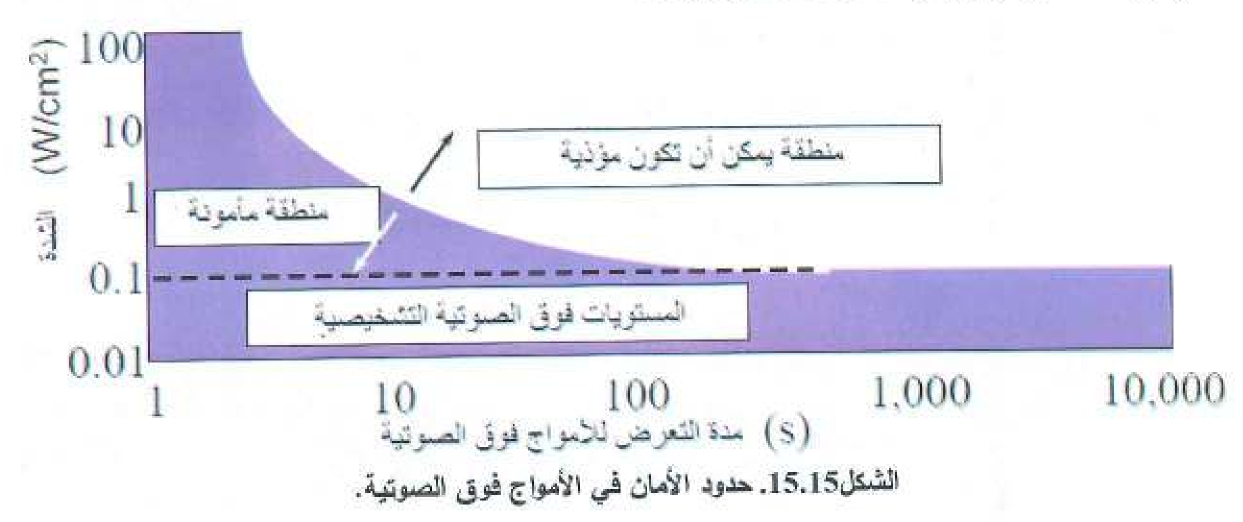
في الشكل 15.14 منحنيات بيانية تدل على تغير معامل تخامد (على سلم لغارتمي) شدة الأمواج فوق الصوتية بدلالة التواتر مقدراً بالـ MHz (على سلم لغارتمي) لكل من الهواء air والرئتين lung والجلد skin والطحال spleen والخصى testis والهموغلوبين hemoglobin والماء water على الترتيب من اليسار إلى اليمين. نلاحظ من هذه المنحنيات تزايد معامل التخامد مع التواتر، مما يوحي بأن استخدام التواترات العالية في الإيكوغرافي (تصوير الصدى) يجعل مجال استكشاف هذه التواترات يقتصر على الأعماق الضحلة. غير إن اللجوء إلى التواترات المنخفضة من أجل زيادة عمق الاستكشاف يؤدي إلى تدنّي المقدرة الفاصلة المحورية، وهي أصغر جزء يمكن تمييزه في مجال الاستكشاف. إذ إن مرتبة المقدرة الفاصلة في أي تقنية تصوير من مرتبة الطول الموجي. وبقدر ما يكون الطول الموجي أقصر تكون المقدرة الفاصلة أعلى. ولهذا يتم اختيار تواتر بحيث يمكننا استكشاف المجال المطلوب بمقدرة فاصلة مقبولة. وقد وجد أن هذا التواتر من مرتبة بضعة ميغاهرتز في تصوير المرأة الحامل.



الشكل15.14.

من المعروف أيضاً أن الأمواج فوق الصوتية يمكن أن تستخدم في تفتيت الحصى(انظر الفصل19)، كما أصبح مؤخراً يمكن تشكيل طلقات فوق صوتية يمكن استخدامها في الجراحة. وهي إضافة إلى ذلك يمكن أن تقوم بمفعولات حرارية ولهذا وضعت ضوابط لاستخدام هذه التقنية. يلخص الشكل15.15 حدود الأمان في استخدام هذه التقنية. حيث تقع مستويات الأمواج فوق الصوتية التشخيصية في مجال الشدات من 0.01 إلى $0.1\mathrm{watt/cm^2}$، مهما كانت مدة التعرض لها. وعندما تزيد شدة الموجة فوق الصوتية على

$0.1 watt/cm^2$ فيجب في هذه الحالة تخفيض مدة التعرض لها وبقدر ما تكون الشدة أعلى يترتب تخفيض مدة التعرض لها وذلك تبعاً للشكل15.15.



الشكل15.15. حدود الأمان في الأمواج فوق الصوتية.

15.15. الخصائص العامة للأمواج الصوتية

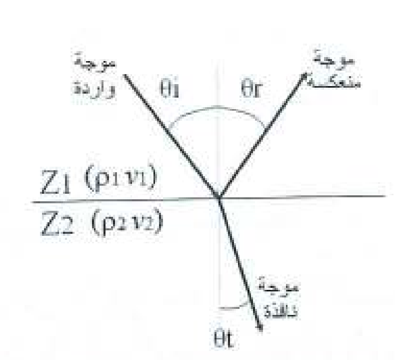
يمكن للأمواج الصوتية، كما هو الحال في الأمواج الضوئية، أن تنعكس وأن تنكسر عند انتقالها بين وسطين مختلفين في ممانعتهما، وأن تبدي ظواهر التداخل والانعراج.

15.15.1. الانعكاس والانكسار

ليكن (وسطان) مائعان ممانعتاهما الصوتيتان Z_1 و Z_2 وكثافتاهما ρ_1 و ρ_2 على الترتيب. ونظراً لاختلاف المائعين في كل من الممانعة والكثافة فإنهما يختلفان حكماً بسرعة الصوت فيهما أي:

$$v_1 = Z_1/\rho_1 \neq v_2 = Z_2/\rho_2$$

فإذا كانت الموجة الصوتية مستوية وجيبية فيمكن تمثيل منحى انتشارها بشعاع صوتي. وعندما تسقط حزمة من الأمواج الصوتية على السطح الفاصل بين وسطين مختلفين بالممانعة الصوتية فإن جزءاً منها ينعكس وينكسر الجزء الآخر (الشكل15.16).

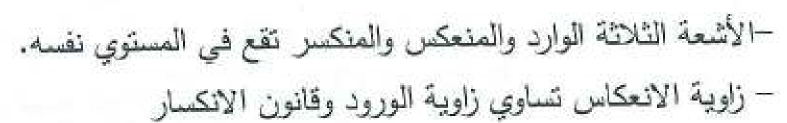


الشكل15.16. انعكاس الموجة الصوتية وانكسارها. الممانعة الصوتية لوسط الورود أصغر من الممانعة الصوتية لوسط الانكسار.

يمكن التحقق بسهولة، كما هو الحال في الأمواج الضوئية، من أن:

–الأشعة الثلاثة الوارد والمنعكس والمنكسر تقع في المستوي نفسه.

– زاوية الانعكاس تساوي زاوية الورود وقانون الانكسار



$$\frac{\sin\beta_i}{v_1} = \frac{\sin\beta_t}{v_2} \qquad (15.41)$$

وهي قوانين تشبه قوانين ديكارت في الضوء الهندسي، حيث يؤدي الحد $1/v$ دور قرينة الانكسار الصوتي للوسط.

إذا كانت A_i و A_r و A_t ترمز إلى سعات إزاحة الأمواج الصوتية الواردة والمنعكسة والنافذة (المنكسرة) على الترتيب فيمكن تعريف عاملي انعكاس السعة r والنفوذ τ لموجة صوتية في الورود الناظمي على النحو:

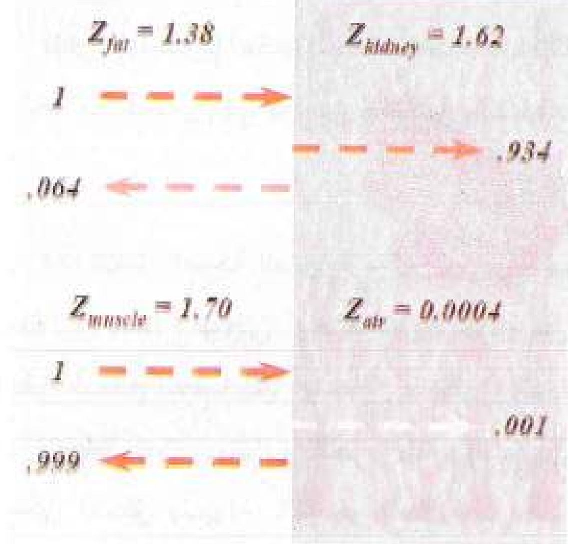
$$r = \frac{A_r}{A_i} = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \text{و} \quad \tau = \frac{A_t}{A_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \qquad (15.42)$$

كما يمكن تعريف كل من عاملي انعكاس R الشدة ونفوذها T على النحو:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad \text{و} \quad R = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}\right)^2 \qquad (15.43)$$

حيث I_i و I_r و I_t ترمز إلى شدات الموجة الواردة والمنعكسة والنافذة (المنكسرة) على الترتيب.

يجدر بالذكر أنه عندما ترد الموجة الصوتية من وسط ممانعته كبيرة (كتلته الحجمية وسرعة انتشار الموجة فيه كبيرتان) إلى وسط ممانعته أصغر (كتلته الحجمية وسرعة انتشار الموجة فيه صغيرتان) كما في الشكل15.16، يلاحظ فيه اقتراب الموجة المنكسرة من الناظم خلافاً لما يحدث للأمواج الضوئية في هذه الحالة.



الشكل15.17

عندما يكون $R = 1$ يكون الانعكاس مثالياً ويشكل السطح الفاصل بين الوسطين مرآة صوتية (الصدى)، وعندما يكون $R = 0$ و $T = 0$ لن يكون هناك لا موجة منعكسة ولا موجة نافذة (منكسرة)، والموجة الصوتية تمتص كلياً من قبل المواد المكوّنة للسطح الفاصل (كالعوازل الصوتية).

أما في النسج حيث تختلف الممانعة الصوتية من نسيج إلى آخر (راجع الجدول 15.2). تجد في الشكل 15.17 إلى اليسار، بتطبيق علاقتي معاملي الانعكاس والنفوذ (15.43)، عاملي انعكاس الشدة ونفوذ الشدة لدى انتقال الموجة الصوتية من نسيج شحمي إلى نسيج الكلية (في الأعلى) ولدى انتقال الموجة الصوتية من نسيج عضلي إلى الهواء (في الأسفل)، حيث يحدث انعكاس تام. وهي ظاهرة يمكن أن تحدث في تصوير الصدى. ولتخفيض الانعكاس والاستفادة من شدة أمواج منبع لدى تطبيق المجس على

الجسم تستعمل مادة هلامية يطلى بها الجسم قبل الشروع بالتصوير. يتصف الهلام بأن ممانعته الصوتية تقع بين الممانعة الصوتية للهواء وممانعة النسج مما يسهل إدخال الموجة الصوتية إلى الجسم.

يمكن بناء عدسات صوتية لتجميع الأمواج الصوتية (كما سنرى في تصوير الصدى)، ويعتبر شبيه الزجاج (البليكسيغلاس) المادة الرئيسية المستخدمة لهذا الغرض.

15.15.2. انعراج الأمواج الصوتية

إن الأمواج الصوتية المسموعة تنعرج بسهولة إلى حد ما لكبر أطوالها الموجية التي تقدّر بنحو $(0.1-1)m$ ، أي من مرتبة الأبعاد المألوفة التي تصادفها مثل الأبواب والنوافذ، إذ إن ظواهر الانعراج تصبح مؤثرة عندما تكون أبعاد الفتحات أو العوائق من مرتبة الطول الموجي. وعلى العكس فإن الأمواج فوق الصوتية القصيرة جداً (مرتبة السنتيمتر)، يكون انعراجها غير ملموس ومِنْ ثَمَّ فهي ذات توجهية عالية.

يفسَّر انعراج الصوت، كما هو الحال في الأمواج الكهرطيسية، تبعاً لمبدأ فرينل – هويغنز، لأن كل جسيم من العائق المصادف يسلك سلوك منبع صوتي ثانوي. إن أقل حيز تحت باب أو نافذة ينقل، نتيجة للانعراج، صوتاً شدته أعلى من تلك التي يفترض مرورها من خلال عرض ذلك الحيز. وتكون الظاهرة أوضح بقدر ما يكون التواتر أخفض. ويمكن، كما في الضوء، تحقيق شبكات انعراج صوتية.

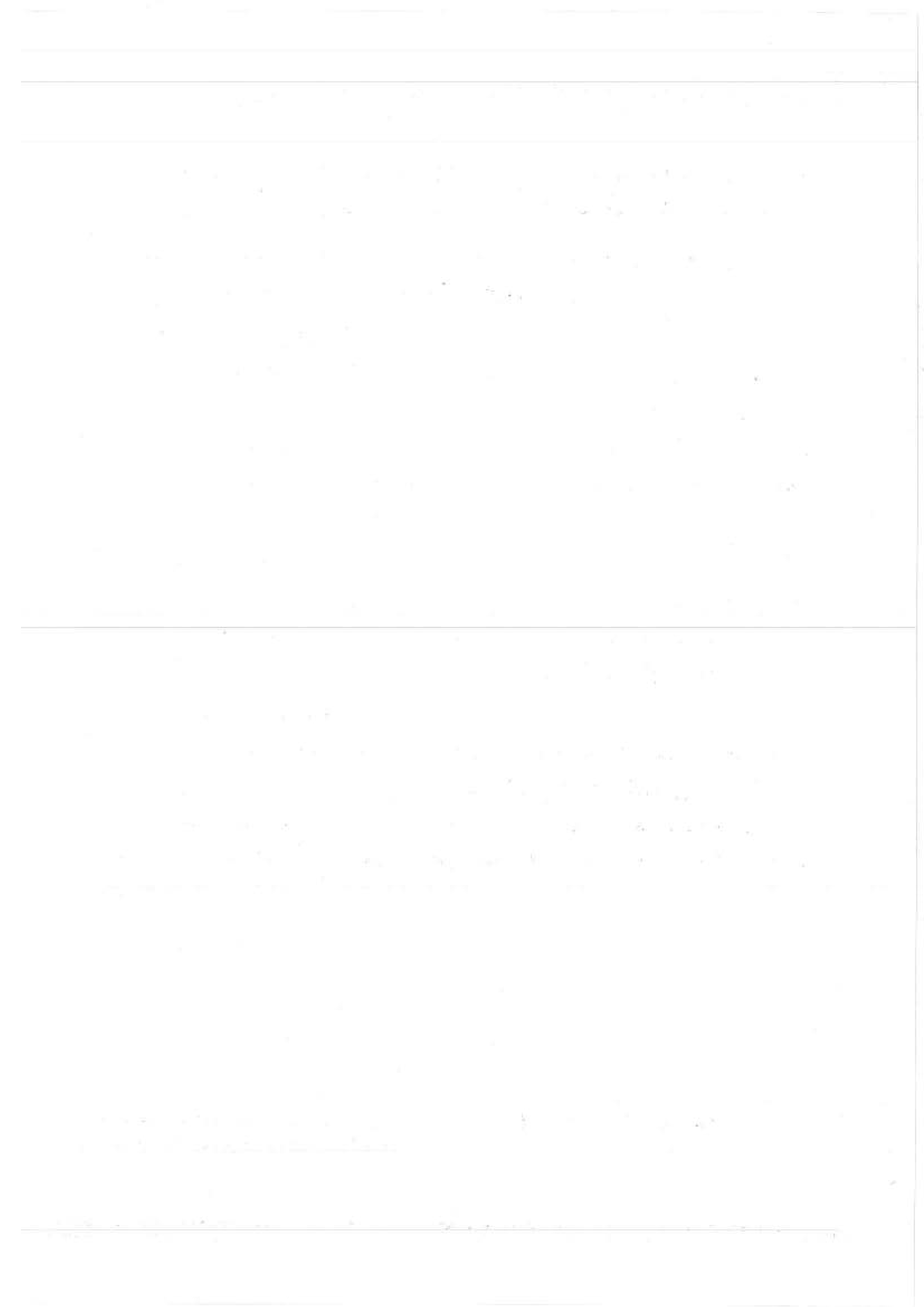
15.15.3. سرعة الأمواج الصوتية

إن الصوت بحد ذاته لا يمكنه الانتشار في الخلاء؛ لأن الموجة الصوتية تتطلب أن تحرك مختلف شرائح مائع وسط الانتشار. تدل التجربة على أن الصوت ينتقل في السوائل بشكل أسرع منه في الغازات، وفي الأجسام الصلبة بشكل أسرع منه في السوائل. ففي الهواء $v=343\,ms^{-1}$ وفي الماء $v=1440\,ms^{-1}$ وفي الفولاذ $v=6000\,ms^{-1}$. يبين الجدول 15.4 القيم التقريبية لسرعة الصوت مقدرة بالمتر/الثانية.

الجدول 15.4

الوسط	السرعة	الوسط	السرعة
الهواء	343(20°C)	الجليد	4000
الهواء	331(0°C)	الماء	14930(25°C)
الهليوم	1005	ماء البحر	1533 (25°C)
الفولاذ	5790	الدم	1570 (37°C)
زجاج البيركس	5640	العضلات	1580(37°C)
البليكسيغلاس	2700	العظم	4000 (37°C)

ويلاحظ تغير سرعة الصوت (كما في الهواء) تغيرات ملموسة بتغير درجة الحرارة (الهواء) ، كما يلاحظ أيضاً تغير سرعة الصوت بتغير نقاوة الوسط (كما في حالة ماء البحر والماء العادي) .



الفصل السادس عشر

الصوت إصداره وسماعه
والأصوات تحت المسموعة

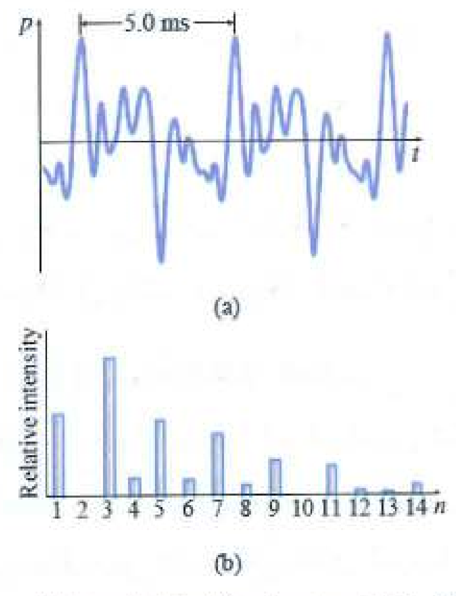
Audible Sound & Infrasound

نتناول في هذا الفصل دراسة تحليلية فيزيائية للصوت ثم نحلّل الاستجابات الفيزيولوجية والنفسية المقابلة عبر جهاز التصويت وطبيعة الكلام وجهاز الاستماع وآلية الاستماع.

16.1. دراسة تحليلية فيزيائية للصوت

يقترن الصوت بحاسة السمع لدينا ومِنْ ثَمَّ بفيزيولوجية الأذن وبالحالة النفسية لدماغنا، الذي يفسر التنبيهات التي تبلغ أذنينا. فهو أولاً التنبيه الفيزيائي الذي ينبه أذنينا عن طريق تغيرات أمواج الضغط الطولانية.

يمكننا تمييز ثلاثة مكوّنات لأي صوت أو موجة صوتية. الأول لا بد من وجود منبع للصوت؛ ومنبع الموجة الصوتية، كما في حالة أي موجة ميكانيكية، هو جسم مهتز. والثاني وسط ينقل الطاقة من المنبع على شكل أمواج صوتية طولانية. وثالثاً مكشاف الصوت أذن أو مكروفون. نبدأ بدراسة بعض مظاهر الأمواج الصوتية نفسها.



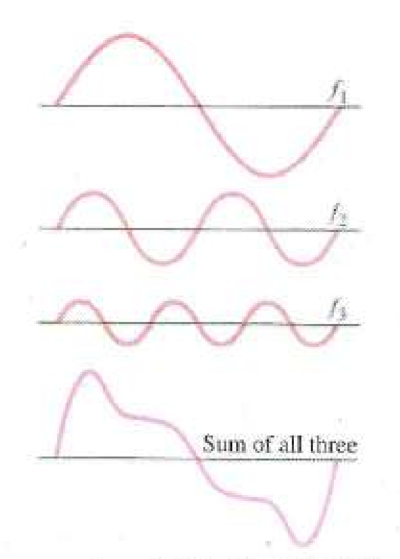
الشكل 16.1: صوت مركب (a) وطيفه الصوتي(b).

إن الموجة الجيبية وتمثيلها الرياضي ليس إلّا تقريباً أولياً يوضح السمات الرئيسة للأمواج، فهو يفترض امتداد الموجة مكانياً وزمنياً إلى ما لانهاية، ومِنْ ثَمَّ تكون السعة ثابتة وكذلك التواتر، لكن الواقع يشير إلى عدم ثبات السعة ولا التواتر في حالة التصويت. ويفرض عدم الامتداد هذا معاملة الصوت معاملة النبضة ومِنْ ثَمَّ فإن الصوت الذي نسمعه مجموع عدة تواترات بسعات مختلفة، فهو يشبه الضوء المركب. وعلينا تحليله إلى مركباته لنستخلص الاستجابات المختلفة. يظهر في الشكل16.1 صوت مركب دوري في الشكل16.1a وتحليل له في الشكل16.1b. يلاحظ

وجود دور لمركبة عالية الشدة، 5ms، اتخذ خاصة مميزة للصوت وأخذ هو المدروج الأساسي، أما في الشكل 16.1b فرسمت الشدة النسبية للمدروجات الأخرى المعبر عنها بمضاعفات التواتر الأساسي؛ ويسمى أحياناً الطيف الصوتي.

يشكل مجموع شدات التواتر الأساسي ومدروجاته الشدة الكلية للصوت. ويعتمد هذا التحليل أو التركيب فيزيائياً مبدأ الانضمام. يظهر في الشكل16.2، مثلاً، انضمام ثلاث موجات: المدروج الأساسي والمدروجان التاليان، ما يفسر جودة هذا التوجه عند المقارنة بين هذين الشكلين.

يقابل هذه الخواص الفيزيائية للصوت استجابات تعتمد على أذن المستمع، ومِنْ ثَمّ فهي تختلف من مستمع إلى آخر وقد اتفق للتعبير عن هذه الاختلافات تاريخياً بمصطلحات خاصة، وذلك قبل التوصل إلى إمكانات التركيب والتحليل الفيزيائية لتعطي هذه المصطلحات صفات عامة، نوردها في التالي.



الشكل 16.2. انضمام ثلاث موجات: مدروج أساسي والمدروجان التاليان.

16.2. خصائص الصوت

قد يؤثر وسط الانتشار على خواص الصوت عن طريق تغير سرعة انتشار الصوت. فقد رأينا في الشكل15.5 كيف يولّد الطبل المهتز (منبع الصوت) موجة صوتية في الهواء، ولو أنه يمكنها أن تنتشر أيضاً في المواد الأخرى. إذ يمكن لسبّاح تحت سطح الماء أن يسمعها معدّلة تختلف عما يسمعه عند ارتطام حجرين أحدهما بالآخر تحت الماء. كما يمكنك، عندما تلامس أذنك الأرض، سماع اقتراب قطار أو شاحنة. مع أنه لا يوجد عملياً، في هذه الحالة، تماس بين الأرض وغشاء الطبل، فإن الموجة الطولانية تنقلها الأرض ثم الهواء، فيوصل الهواء الاهتزازات إلى الأذن الخارجية ليفسرها دماغنا. لا يمكن للصوت أن ينتشر في غياب المادة. فلا يمكن مثلاً سماع الجرس الذي يقرع داخل ناقوس مخلى، ولا يمكن للصوت أن ينتشر في مراكز الفضاء الخارجي الخالية. وتكون سرعة انتشار هذه الأمواج مميزة للوسط.

16.2.1. سرعة انتشار الصوت

تختلف سرعة الصوت في المواد من مادة إلى أخرى. فتبلغ في الهواء، في درجة الصفر المئوي، وفي الضغط واحد جو 331m/s. وقد رأينا من المعادلة 15.18 $v=\sqrt{B/\rho}$، أن سرعة انتشار هذه الأمواج في وسط معين تعتمد على عامل المرونة الحجمي B للوسط وكثافته ρ (كتلته الحجمية). وعليه نجد أن سرعة الصوت في الهليوم، الذي يتصف بأن كثافته أخفض من الهواء ولا يختلف عامل مرونته كثيراً

عنه، تزيد ثلاث مرات على ما هي في حالة الهواء. بينما تتميز السوائل والأجسام الصلبة بسبب كونها أقل قابلية للانضغاط من الغازات، بعوامل مرونة أكبر بكثير ومِنْ ثَمَّ سرعة الصوت فيها عالية. يعطي الجدول15.4 في الفصل السابق سرعة الصوت في مواد مختلفة. تعتمد قيم السرعة نوعاً ما على درجة الحرارة، ولو أن هذا الأمر يكون ملحوظاً بشكل رئيسي في حالة الغازات. ففي الهواء وفي درجة الحرارة العادية مثلاً تزداد السرعة تقريباً بنحو $0.60 m/s$ لكل زيادة في درجة الحرارة قدرها درجة مئوية واحدة:

$$v \approx (331 + 0.60t) m/s$$ (سرعة الصوت في الهواء)

حيث t درجة الحرارة على السلم المئوي. ومِنْ ثَمَّ فهي تساوي: $v = [331 + 0.60 \times 20] m/s = 343\ m/s$ في درجة الحرارة $20^\circ C$. تضاف إلى سرعة الصوت وخصائصه الفيزيائية مصطلحات لها علاقة بالمستمع مثل **علوّ الصوت loudness** الذي يقابل إدراك المستمع لشدة الصوت الكلية، أي شدة التواتر الأساسي ومدروجاته، وسنتناول التعبير عنه كمياً لاحقاً، **وحدّة الصوت أو طبقته pitch** التي تصف فيما إذا كان تواتر الصوت مرتفعاً، وهي تقابل التواتر الأساسي بصورة رئيسية؛ لأن طيف الصوت لكل آلة شبه ثابت، كصوت السُّرناي (وهو فلوت صغير) أو الكمان، أم إذا كان التواتر منخفضاً كصوت الطبلة الكبيرة bass drum أو صوت الآلات الوترية الخفيض string bass. بقدر ما يكون التواتر أخفض، تكون حدَّة الصوت أخفض؛ وبقدر ما يكون التواتر أعلى تكون الحدَّة أعلى. تستطيع أفضل أذن بشرية الاستجابة إلى التواترات التي تقع بين 20Hz ونحو 20,000Hz. يدعى هذا المجال التواتري بالمجال السمعي audible range. يتغير هذان الحدان نوعاً ما من شخص إلى آخر. يصبح المرء مع تقدم العمر أقل قدرة على سماع التواترات العالية، ومِنْ ثَمَّ يمكن أن ينخفض حد التواترات العالية إلى 10,000Hz فما دون.

أما التواترات التي تقع خارج المجال السمعي فيمكن أن تصل الأذن من دون أن ندركها عموماً. تدعى التواترات التي تزيد على 20,000 Hz الأمواج فوق الصوتية ultrasonic. يمكن للكثير من الحيوانات أن تسمع التواترات فوق الصوتية؛ فالكلاب مثلاً يمكن أن تسمع أصواتاً تصل تواتراتها إلى 50,000Hz، كما يمكن للخفاش أن يكشف عن تواترات تصل إلى 100,000Hz. للأمواج فوق الصوتية الكثير من التطبيقات في الطب وفي مجالات أخرى.

أما الأمواج الصوتية التي تقع تواتراتها تحت المجال السمعي (أي أخفض من 20Hz) فتدعى الأمواج تحت الصوتية infrasonic. تتضمن منابع الأمواج تحت الصوتية الزلازل الأرضية والرعد والبراكين والأمواج التي تولدها الآلات المهتزة الثقيلة. يمكن لهذا المصدر الأخير أن يضر بالعمال، لأن الأمواج تحت الصوتية على الرغم من كونها غير مسموعة يمكن أن تضر بجسم الإنسان. تعمل هذه الأمواج المنخفضة التواتر بأسلوب تجاوبي مؤدية إلى تحريك أعضاء الجسم وتهيجها.

مثال16.1. التبئير الذاتي في حالة الأمواج الصوتية. تحدد مصوّرات الإحكام الذاتي القديمة البعد بإصدار نبضة صوتية عالية التواتر جداً (فوق صوتية)، تنتشر نحو الجسم الذي يتم تصويره، لتعود منعكسة إلى كاشف حساس فيها، على النحو المبين في الشكل16.3. لأخذ فكرة عن الحساسية الزمنية اللازمة لكاشف المصوّرة وجودة أدائه، احسب زمن انتشار النبضة في حالة جسم (a) يبعد متراً واحداً و(b) يبعد عشرين متراً.



الشكل16.3. مصوّرة إحكام ذاتي تصدر نبضة فوق صوتية. تمثل الخطوط المستمرة صدر الموجة لنبضة الموجة الخارجة التي تنتقل نحو اليمين، في حين تمثل الخطوط المتقطعة النبضة المنعكسة عن وجه الشخص والعائدة نحو المصوّرة. تسمح المعلومات الزمنية للمصوّرة بالتحكم في العدسة بحيث تقرّب عند البعد المناسب.

طريقة الحل. إذا فرضنا أن درجة الحرارة نحو 20°C، فإن سرعة الصوت تبلغ 343m/s. باستخدام هذه السرعة v والبعد الكلي d ذهاباً وإياباً في كل حالة يمكننا الحصول على الزمن بتطبيق العلاقة $v = d/t$.

الحل. (a) تنتشر النبضة متراً واحداً في الذهاب نحو الجسم ومتراً واحداً في الارتداد إلى الخلف، أي تنتشر مترين إجمالاً. نحل العلاقة $v = d/t$ من أجل:

$$t = \frac{d}{v} = \frac{2.0m}{343m/s} = 0.0058\,s = 5.8ms$$

(b) يبلغ البعد الكلي في هذه الحالة $2 \times 20 = 40m$ ومِنْ ثَمَّ:

$$t = \frac{40m}{343m/s} = 0.12s = 120ms$$

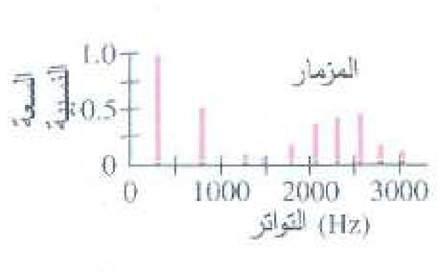
ملاحظة. تستخدم مصوّرات الإحكام الذاتي الحديثة الأشعة تحت الحمراء ($v = 3\times10^8 m/s$) عوضاً عن الأمواج فوق الصوتية أو صفيفاً من الحساسات الرقمية. يكشف هذا الأخير عن اختلافات شدة الضوء بين المستقبلات المتجاورة لدى حركة العدسة إلى الأمام وإلى الخلف بشكل آلي، حيث تختار بعد العدسة الذي يوفر أفضل تباين في الشدة (البؤرة الأكثر حدّة).

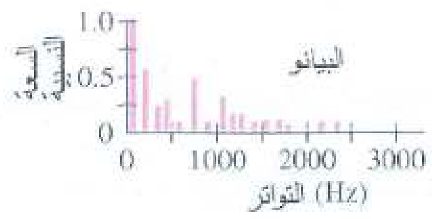
طابع الصوت. هو الخاصة الثالثة التي تختلف بها آلة عن أخرى ومن مستمع إلى آخر. إذ عندما نسمع صوتاً، نغمة موسيقية بشكل خاص، فإننا ندرك حدة النغمة وعلوّها، كما ندرك سمة ثالثة لها هي طابعها timbre أو نوعيتها quality. فعندما يعزف على البيانو ثم على المزمار نغمة لها الحدّة والشدة نفسهما مثلاً، سيكون الفارق واضحاً في مجمل الصوت. ولن يحدث لدينا التباس بين البيانو والمزمار.

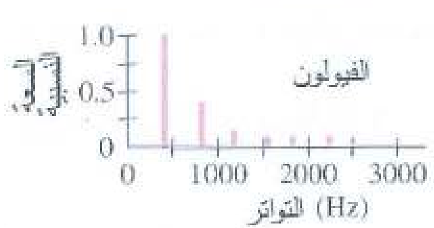
وهذا ما يقصد بطابع الصوت. يعتمد طابع الصوت على طيف الأصوات، أي على وجود مدروجات معينة وبسعات معينة. فعندما تعزف نغمة معينة على آلة موسيقية، يصدر عنها أصوات ناتجة عن

المنبع الأصلي كاهتزاز الوتر في الآلات الوترية معدلة ومضخمة بالتواترات الطبيعية التي يفرضها شكل الأداة وأبعادها.

فالسعات النسبية لمدروجات نغمة معينة تختلف من آلة موسيقية إلى أخرى، وهذا ما يمنح كل آلة طابعها المميز إضافة إلى عدد المدروجات التي ترافق نغمة معينة. يبين الشكل16.4 أمثلة نموذجية لآلات موسيقية مختلفة. يكون للنغمة الأساسية عادة أعلى سعة.







الشكل16.4. الأطياف الصوتية لبعض الآلات الموسيقية. تختلف الأطياف عندما تعزف الآلات نغمات مختلفة. فالمزمار معقد قليلاً. فهو يعمل كأنبوب مغلق عند التواترات المنخفضة، ويتميز بتواترات فردية فقط، ولكن جميع التوافقيات تحدث عند التواترات العالية، كما هو الحال في أنبوب مفتوح.

16.3. الاستجابات الفيزيولوجية للصوت

في حين أن الخصائص الفيزيائية هي موضوعية وقابلة للقياس عملياً، فإن الاستجابة الفيزيولوجية شخصية، تختلف من فرد إلى آخر، وتحتاج إلى معدات وتحليلات أكثر تعقيداً من الأولى. سنتناولها تباعاً.

16.3.1. تأثير حدَّة الصوت

تتمثل الاستجابة بإدراك أن الإحساس الصوتي غليظ أو حاد. وتدل التجربة على أن الصوت يدرك أكثر حدَّة بقدر ما يكون تواتره أكثر ارتفاعاً وفي حالة صوت بسيط، يمكن تعيين الإحساس بالحدَّة أو بالغلاظة من خلال هذا التواتر. بدأت محاولة التعبير عن الحدّة للأذن البشرية مبكراً منذ عهد فيثاغورث. فوجد تجريبيا كيفية توصيف مقدرة شخص على التمييز بين حدة صوتين بتعريف عتبة التمييز. فإذا سمع الشخص نفسه صوتين متساويين في الشدة ومتقاربين في التواتر كأن يكون تواترهما f و $f+\Delta f$، وكان Δf يمثل أصغر تباعد بين هذين التواترين يعطيان إحساساً واضحاً بالحدَّة يمكن تمييزه، لدى الشخص، عبّر عنه بالعتبة كمياً، ووجد أن هذه العتبة تختلف باختلاف مجال التواترات، وفي منطقة محددة من التواترات، كانت النسبة:

$$\frac{\Delta f}{f} = const$$

ثابتة وتسمى العتبة التفاضلية لحدَّة الصوت، وهذا المفهوم يشبه العتبة التفاضلية بين لونين بسيطين وتتعلق قيمته:- بالفرد وتقع بين $1/80$ و $1/1000$ ووضع لها واحدات مناسبة.

حيث $\frac{\Delta f}{f}=\frac{1}{80}=1\ comma$ و $\frac{\Delta f}{f}=\frac{1}{1000}=1\ savant$

- و بمجال التواتر

- وبالشدة الصوتية، وبقدر ما تكون الأصوات ضعيفة تكون هذه العتبة أعلى. حيث يحدث لَبْس بين صوتين شدتاهما ضعيفتان ولو أنهما يختلفان في الحدّة. وعليه يمكن تعريف الحدّة كمياً H بجعل الفرق في العلاقة السابقة لامتناهياً في الصغر ثم المكاملة لنجد:

$$dH=K\frac{df}{f} \quad \text{ومِنْ ثَمَّ :} \quad H_2-H_1=K\log\frac{f_2}{f_1}$$

ترتبط قيمة الثابت K بالوحدات المستخدمة.

إن هذا الفرق في الحدّة بين الصوتين والموافق للنسبة بين تواتريهما يشكل بعداً interval موسيقياً . فالعلامات الموسيقية مثلاً توافق قيماً بسيطة لهذه النسبة:

- في حالة اتحاد النغمات (القرار):

$$f_2/f_1=1$$

- في حالة الأوكتاف (الجواب): قال الفيثاغوريون الأوائل وربما فيثاغورث نفسه إن هذه " النسبة" والتوافقيات المقابلة وثيقة الصلة باكتشافه للأوكتاف. ففي النسبة التوافقية 6 : 8 : 12، تشكل النسبة 6 : 12 الأوكتاف فيه 8 : 12 الخمس و 6 : 8 الربع وهكذا، وربطوا بين هذه التوافقيات وراحة النفس والروح و السلام الداخلي، فشجعوا على سماعها حتى إن بعضهم يصفها علاجاً. كما اقترحوا سلالم موسيقية مقابلة. مثل السلم الدياتوني diatonic scale المؤلف من ست علامات بين علامتي الثماني بحيث نحصل على الأبعاد:

$$do^{1}\ \ re^{1}\ \ mi^{1/2}\ \ fa^{1}\ \ sol^{1}\ \ la^{1}\ \ si^{1/2}\ \ do$$

حيث: 1 ton = 50 savant (البعد)

وفي حالة علامات السلم اللوني chromatic scale، تغير العلامة، فالعلامة المرفوعة تقع $\frac{1}{2}$ درجة أعلى من العلامة الطبيعية، والعلامة المنخفضة تقع درجة $\frac{1}{2}$ إلى أسفل.

16.3.3. تأثير علوّ الصوت

علوّ الصوت هو الصفة الفيزيولوجية التي تميز فيها الأذن الصوت الشديد القوي من الصوت الضعيف الخافت. على سبيل المثال، مجرد التوقف عن بض وتر الغيتار، يضعف إدراك الأذن لهذه الموجة في

الوقت نفسه الذي تتخامد فيه اهتزازات هذا الوتر وتنخفض كثافة استطاعته. وعندما يهتز غشاء تنقل عظيمات السمع اهتزازه إلى النافذة البيضية في الأذن الداخلية فتحوله إلى إشارة عصبية، وكما سنرى لدى دراسة تشريحية الأذن، استجابات تغير من الطيف الصوتي، ولاسيَّما عند الشدات العالية حيث تصبح استجابة الأذن لا خطية يمكن أن تمزج بين التواترات فتفقد رهافة التمييز بين الأصوات.

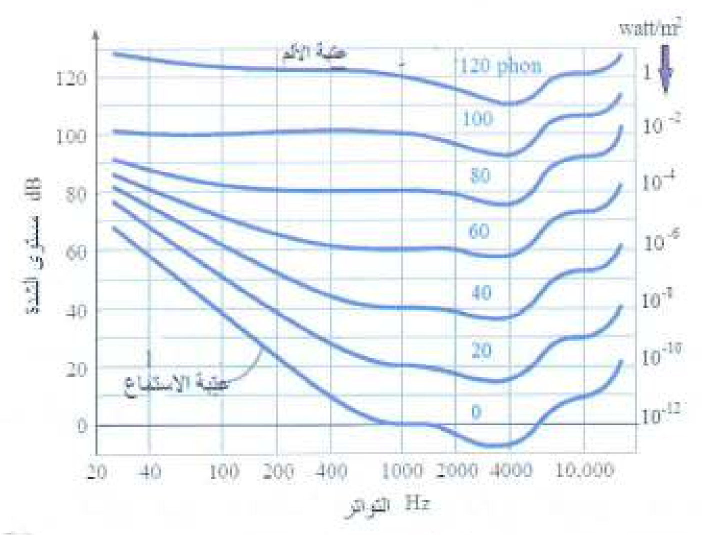
نظراً لاختلاف هذا التمييز بين شخص وآخر وعلاقته بالتواتر والشدة يسجل لكل شخص ما يعرف بالساحة السمعية وتقارن بالساحة السمعية المتوسطة لعدد كبير من البشر وقد بدأ هذه القياسات فيلتشر ومونسون.

بالاعتماد على مقياس السمع audiometer، الذي يسمح بالمعرفة الدقيقة لتواتر صوت صادر بالإضافة إلى الضغط الصوتي الذي تحمله الموجة ومن ثم كثافة الاستطاعة، أصبح ممكناً إجراء قياس لعتبة السمع المرتبطة بالشدة لكل تواتر وفق التجربة الآتية: نجعل شخصاً سوياً يستمع إلى صوت بسيط تواتره معروف تزاد شدته تدريجياً حتى يستطيع الشخص إدراكه فتتعين عتبة سمعه لهذا التواتر.

ومن الجدير بالذكر أن قيمة هذه العتبة تتغير بدلالة تواتر الموجة الصوتية. يمثل الشكل16.5 تغيرات هذه العتبة بدلالة التواتر، أو ما يعرف بمنحني عتبة الاستماع، في حالة أفراد أسوياء يتمتعون بقيم وسطية وهو يبدي نهاية صغرى قليلة الوضوح حول التواترات 1000-5000Hz وبزيادة كثافة الاستطاعة من أجل كل تواتر يمكن تتبع التغير في الاستجابة حتى يصبح الإحساس الصوتي مؤلماً فتتعين عتبة الألم. يلاحظ أن مستوى الشدة مقدر بالديسيبل نظراً للتبعية اللوغاريتمية وتساوي الصفر عند التواتر 1000Hz.

- تشكل المساحة المحصورة بين هذين المنحنيين المساحة السمعية أي مجال الإحساسات الصوتية (الشكل16.5).

كما يلاحظ تمثيل التواترات المسموعة بالإحداثيات اللغارتمية لاتساع مجالها. يطلق على هذا التمثيل اسم "منحنى المستوى الصوتي لفليتشر ومونسون". ويستعمل الآن منحني معدل ليأخذ في الحسبان معايير العلو المعتمد عالمياً.



الشكل16.5. حساسية الأذن البشرية بدلالة التواتر. لاحظ أن السلم التواتري لغارتمي وذلك لتغطية مجال كبير من التواترات

16.3.4. سلّم الشدة الصوتية قانون فيبر – فيشنز

نظراً للعلاقة الواضحة بين الشدة الصوتية والإحساس بها فُكر بادئ الأمر بتعريف سلم للشدة الصوتية اعتماداً على الاستطاعة التي تحملها الموجة الصوتية، فوجد أن الصوتين اللذين لهما التواتر نفسه (الحدَّة نفسها) ويدركهما المجرب متعاقبين، يولدان إحساساً بالشدة واضحاً عند قيمة معينة للفرق بين كثافتي استطاعتيهما، فإذا كانت قيمتاهما I و $I+\Delta I$ اعتبر فيبر weber الفرضية التي تنص على أنه في مجال معين من التواترات يكون:

$$\frac{\Delta I}{I} = cte$$

يمكن لهذه النسبة أن تشكل عتبة تفاضلية للشدة وقيمتها من مرتبة 0.2.

تبعه فيشنر فاقترح سلم فيشنر Fechner اعتماداً على افتراض أن تغيرات الشدة اللامتناهية في الصغر الموافقة لدرجات الإحساس المتعاقبة تكون متساوية ومِنْ ثَمّ يمكن أن نكتب:

$$dS = K\frac{dI}{I} \qquad (16.1)$$

حيث تعبر S عن الإحساس بالشدة.

– وإذا كان الإحساس بالشدة معدوماً عند عتبة الاستماع المقابلة للقيمة $I_0 = 1.0\times10^{-12} W/m^2$ يعطى الإحساس بالشدة I_i وفق العلاقة:

$$S_i(dB) = 10\log\frac{I_i}{I_0} \qquad (16.2)$$

يطلق على هذه العلاقة اسم قانون فيبر _ فيشنر Weber Fechner حيث يتناسب الإحساس المتولد طردياً مع لغارتم التنبيه.

تسمح هذه العلاقة بإنشاء سلم صوتي (بالديسيبل) يسهم في تعيين الشدة بالاعتماد على كثافات الاستطاعات. وفي الحقيقة، لا يمكن للعلاقة (16.2) أن تكون سلماً للإحساسات:

– فكما تتعلق كثافة الاستطاعة السطحية بالتواتر، فإن الإحساس يتعلق به أيضاً، فالاستطاعة $40dB$ عند $100Hz$ مسموعة، لكنها تصبح غير مسموعة عند $80Hz$.

– إن قانون فيبر – فيشنز ليس سوى قانون تقريبي، ويختلف الثابت في الحقيقة تبعاً لمجال التواترات المعتبرة، وهذا لا يعني تعريف سلم واحد للشدة بل عدة سلالم.

– أخيراً يتدخل الزمن في إدراك صوت معين. فالأذن لا تستجيب على الفور لتغيير معين في كثافة الاستطاعة السطحية، بل تحتاج إلى مدة معينة للتكيف تجعلها حساسة أكثر لتغيرات الشدات الصوتية.

السلم الشخصي:الفون (الوحدة الصوتية) phone

لتعيين الشدة الصوتية الشخصية نلجأ إلى الطريقة الآتية:

يختار صوت بسيط مرجعي، تواتره 1000Hz، وتضبط كثافة استطاعته السطحية I_{R1} بحيث يحصل على مستوى صوتي معين (بالديسيبل):

$$S_{R1}(dB) = 10\log\frac{I_{R1}}{I_0} \qquad (16.3)$$

وبالفرض، يقال إن شدتها الصوتية تساوي I_{R1} من الفونات. يفترض حينئذٍ صوت آخر تواتره f، تُضبط كثافة استطاعته السطحية إلى أن يحصل على الإحساس بالشدة نفسه للصوت المرجعي السابق؛ وبالفرض $I_1 = I_{R1}$؛ فيكون المستوى الصوتي الموافق (بالديسيبل):

$$S_{fR1}(dB) = 10\log\frac{I_{R1}}{I_0} \qquad (16.4)$$

– نقوم بالشيء نفسه في حالة أصوات تواتراتها مختلفة(f_i)، بتسجيل القيمة الموافقة (S_i) التي تعطي في كل مرة الإحساس نفسه بالشدة، يمثّل الخط البياني $S_i = g\left(f_i\right)$ أو المنحنى المتساوي الشدة مجموعة الأصوات التي لها شدة تقدر بنحو I_{R1} من الفونات.

– ومنْ ثَمَّ يكفي تثبيت قيمة جديدة للمستوى الصوتي، بالديسيبل في حالة التواتر المرجعي $1000\,Hz$ ومقارنته بأصوات مختلفة التواترات. فنحصل على مجموعة من المنحنيات متساوية الشدة (الشكل16.5)، تُحَدُّ من الأسفل بمنحني عتبة الاستماع الذي يوافق، بالفرض، شدة تساوي 0 phone ومن الأعلى بمنحني عتبة الألم التي توافق 120 فوناً.

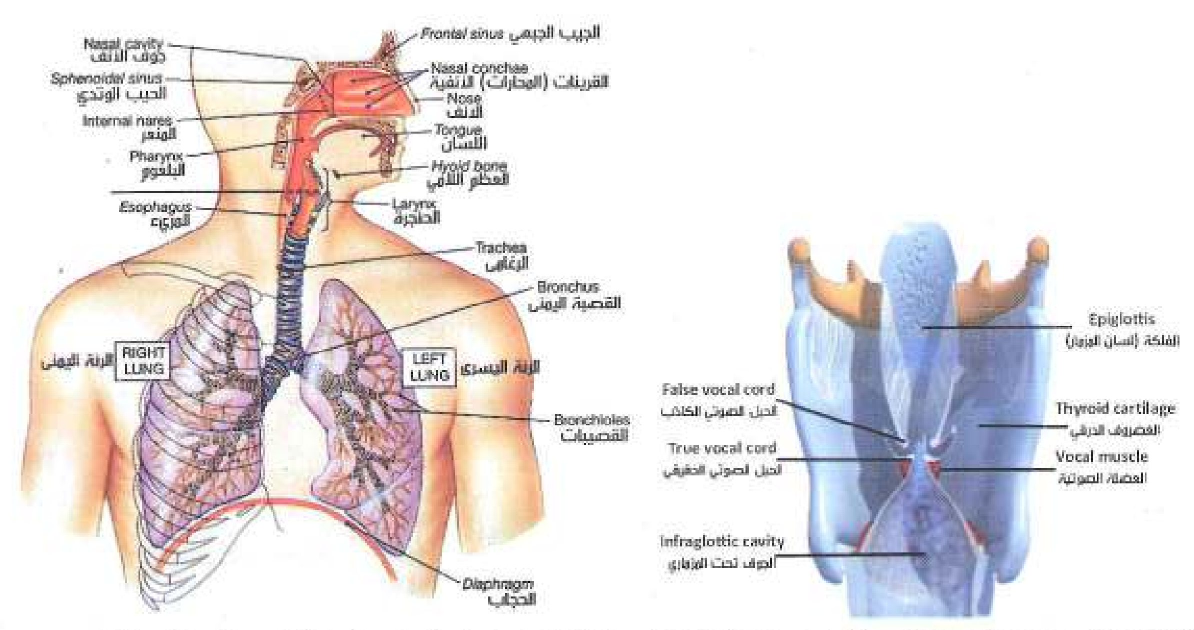
– **وبالتعريف:**

إن صوتاً معيناً له مستوى صوتي ذو n فوناً عندما يكون الإحساس بالشدة الذي يولده عند شخص متوسط مماثلاً إحساس صوت بسيط تواتره 1000Hz ويقدّر مستواه الصوتي بنحو n ديسيبلاً مطلقاً.

والفون، كالديسيبلات ليس له واحدة (عدد من دون واحدة)، ولكنه دليل على المستوى الصوتي.

16.4. جهاز التصويت وطبيعة الكلام

يؤدي جهاز التصويت واحدة من أهم وظائف الاتصال مع العالم الخارجي، عن طريق إصداره للأمواج الصوتية التي تقع ضمن المجال التواتري الذي تدركه أجهزة الاستماع لدى الأفراد الآخرين.



الشكل16.6. مجرى الصوت لدى الإنسان يتدخل فيه كل من الرئتين والحنجرة وتجويفي الأنف والفم على الترتيب.

يظهر في الشكل16.6 جهاز التصويت. يتكون جهاز التصويت لدى الإنسان، شأنه في ذلك شأن أي أداة موسيقية هوائية، من ثلاثة عناصر وهي النفاخة وتتمثل في الرئتين، والهزازة وتمثل في الحبال الصوتية، وحجرة التجاوب التي تتكون من التجويف البلعومي الفموي، وتقوم شبكة عصبية شديدة التخصص بالتحكم في عناصر الجهاز.

إن تدفق الهواء الذي يخرج من الرئتين في أثناء الكلام يهز الحبلين الصوتيين في آن واحد، وإن هذا الاهتزاز يحوّله إلى لقم صوتية متعاقبة شبه دورية، تميز المنبع الصوتي. إن هذا التدفق الهوائي والصوتي سينتشر على طول المجريين الفموي أو الأنفي أو كليهما وسيحولانه طيفياً (سيرشحانه) إلى إصدار من خلال الشفتين أو المنخرين أو جميعهنّ. إن شكل المجرى الفموي، في توليد حروف المد، يترك المجال إلى جريان منتظم نسبياً (رقائقي)، في حين أن الاختناق الشديد لهذا المجرى، بل إغلاقه سيحرض ظهور ضجيج اضطراب. وهذا ما يميز الحروف الصوتية consonant. وبذلك يؤدي إغلاق المجرى وفتحه المفاجئ نتيجة لحركة الشفتين (p, b, m) أو لحركة اللسان (t, n, k) إلى توقف مؤقت للإشارة يعقبه ضجيج انفجاري مقتضب جداً، كما أن تضيق المجرى يحدث ضجيج احتكاك منتظم نسبياً (f, d, ch). إن شكل التجاويف الفموية oral ينتج عن وضع اللسان والفك والشفتين، كما أن الحفرتين الأنفيتين تسهمان إذا خفّض شراع الحنك كما هو الحال عادة في التنفس. ثمة عدة عشرات من العضلات التي تتحكم على التوازي في منبع ومجرى الصوت الذي يمكن أن يتغير شكله بسرعة مع الزمن (حيث يستمر صوت معين أقل من 100ms وسطياً)، وهذا ما يعطيه مرونة عالية تفوق أفضل الآلات المبتكرة، وقد تقترب الآلة المساعدة بالحاسوب من أدائه.

16.5. الأذن وآلية الاستماع

16.5.1. الأذن

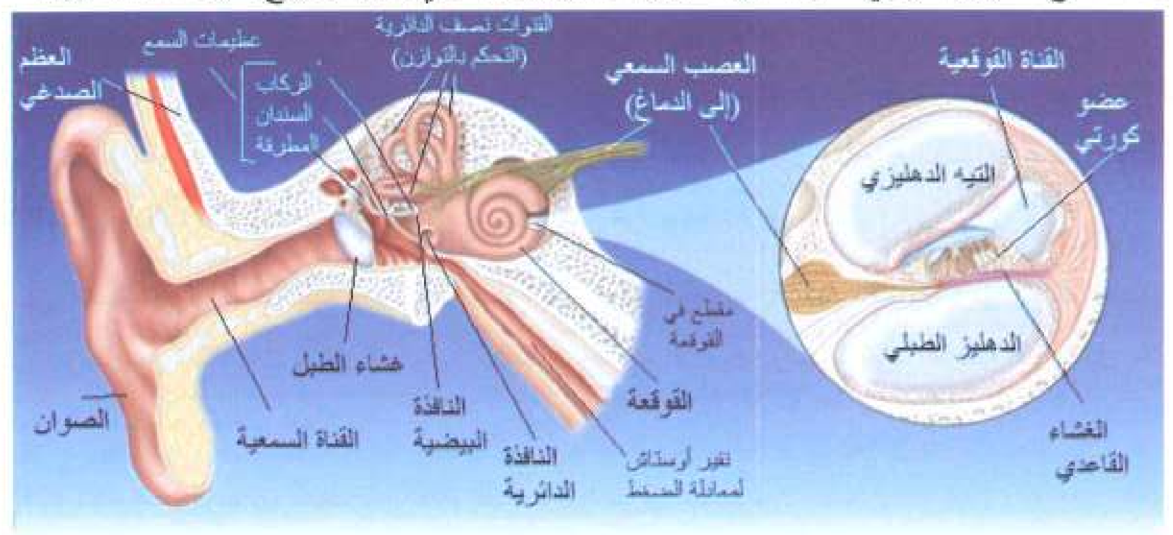
وتتألف من ثلاثة أقسام رئيسية (الشكل16.7).

- الأذن الخارجية، المسؤولة عن استقبال الأمواج الصوتية.
- الأذن الوسطى، التي تؤدي دور منظم regulator للتنبيه الصوتي فتخفضّه أو تضخمه، كما تؤدي دور ملئم للممانعة الصوتية.
- الأذن الداخلية، حيث يجري تحويل transduction التنبيه الميكانيكي إلى إشارة كهربائية عصبية في اتجاه الدماغ.

16.5.1.1. الأذن الخارجية

وتتضمن:

- الصّوان الذي يستقبل الأمواج الصوتية ويجمّعها (ولاسيّما لدى الحيوانات) كالبوق الصوتي.
- قناة السمع الخارجية، وهي ضرب من المجاوب resonator الذي ينقل الأمواج نحو غشاء الطبل.



الشكل16.7. تشريحية الأذن.

16.5.1.2. الأذن الوسطى

إن غشاء الطبل هو غشاء دائري مرن، معلّق بعضلات تهتز بفعل اهتزازت الضغط المحمولة بالموجة الصوتية. وسعات هذه الاهتزازات ضعيفة تقدر بنحو بضعة أعشار الأنغستروم عند1000Hz، وبضعة مكرومترات عند 100Hz. وهذا الغشاء قليل الاصطفائية في حالة عدد كبير من التواترات.

تتألف العظيمات من المطرقة التي تشرع بالحركة نتيجة لاهتزازات غشاء الطبل، فتنقل هذه الحركة نحو السندان الذي يحرك الركاب، الذي يضخ اهتزازته في النافذة البيضية ويجعلها تهتز. ثمة عضلتان

(التواتر) والوسيط المكاني (الفاصلة)، ثم تنقل هذا التحليل عن طريق كواشف تدعى الخلايا الهدبية نحو عصبونات العصب السمعي، حيث ترمّز فيها على شكل تغير في الفعلية العصبية (السيالة العصبية) بدلالة الزمن وبدلالة التواتر المميز للعصبونات، وإن هذا التغير يدل على موقع ارتباطها في الغشاء القاعدي.

16.5.4. معالجة الإشارة في العصبونات

وهنا تبدأ المعالجات العصبونية التي تجري على التوازي من خلال بنى المراكز السمعية المعقدة وغير المعروفة جيداً حتى القشرة. إن المواقع التواترية للعصبونات في الدماغ أي الاصطفائية التواترية الدقيقة نوعاً ما وتعضّيها التضاريسي تبعاً للتواتر المميز _ يحفظ جزئياً في أثناء المعالجات.

إن النظام السمعي، كالنظام البصري، يوفر إذاً بطاقات فعلية للإشارة المحللة. ومن أكبر تحديات فيزيولوجية الاستماع وتشريحيته هو تحديد وسطاء التعضي organization بالإضافة إلى تواتر التحليل ودور هذه البطاقات في تشكيل التمثيلات السمعية العالية المستوى. وبذلك أمكن تعيين موضع العصبونات التي تستجيب اصطفائياً لبعض تواترات التضمين حول التواتر المميز والتي يحتمل أن تفيد في تقدير حدّة (التواتر الأساسي) صوت معقد أو تقدير تجمع للمركبات الطيفية الإحداثية للتعرف على المنابع. وقد أمكن كذلك إظهار صور حقيقية لاختلافات الطور أو الشدة بين الأذنين لدى بومة خائفة تتقارب عند أعلى مستوى نحو بطاقة كاملة من العصبونات المستقبلة للموقع التي تسمح لهذا المفترس الليلي بتحديد موقع فريسته بدقة كبيرة باستخدام كواشفه الصوتية.

16.5.5. نمذجة إدراك الكلام

إن معالجة الإنسان للكلام يجب النظر إليها في ضوء هذه المبادئ العامة لهذه الوظيفة، وبذلك فإننا نعلم أنه في المستوى الأدنى تتوافر تمثيلات جيدة للطيف اللحظي وفق شدات دينميكية واسعة، كما تتوافر كذلك عصبونات متخصصة في المعالجة الزمنية وقادرة على الإشارة بدقة إلى لحظة ظهور تغير طيفي سريع. وعند المستوى الأعلى تتوافر عصبونات تستجيب بشكل اصطفائي إلى تنبيهات أكثر تعقيداً (ضجيج وفق عصابة عريضة، أطياف بعدة نهايات، الحروف الصوتية الخاصة)، ولكن مبادئ التعضي لهذه التمثيلات الوسطية (وهي معقدة أصلاً ولو أنه لم تفك رموزها بعد) ما تزال مجهولة. وربما بالاعتماد على مجموعة الأدوات الحيوية العامة التي يوفرها النظام السمعي لدى الفقاريات، بالإضافة إلى الإجهادات الخاصة بالأشياء الصوتية التي يحدثها النظام الصوتي الإنساني يمكن التقدم بشكل ملحوظ في نمذجة إدراك الكلام.

16.6. الأمواج تحت الصوتية

إنك تمسك هذا الكتاب بيدك وتقلّب صفحاته ببطء وتجوب سطوره بعينيك بحثاً عن موضوع ترغب بقراءته، وعندما تجده تصحح وضعيتك استعداداً للتركيز على السطور القادمة.

لا شك أن هذه الحركات تبدو لك قليلة الأهمية، لكن آلياتها العضلية تترافق بأصوات مميزة لا يمنعنا من سماعها سوى عدم حساسية الأذن البشرية للتواترت المنخفضة، ويمكن لدراسة هذه الأصوات أن تكون مفيدة في العلوم وفي الطب على حد سواء.

وإن التواتر السائد في الأصوات العضلية، الذي يقدّر بنحو 25 Hz قريب من عتبة السمع. وعلى الرغم من علم الفيزيولوجيين والأطباء بوجود مثل هذه الأصوات منذ عدة قرون فإنهم لم يعتبروه إلاّ عنصر تشويش. وقد سمح تقدم تقانة الحواسب الإلكترونية والأدوات الطبية حالياً بدراسة هذه الأصوات دراسة تفصيلية دلت نتائجها على أن هذه الأصوات تنشأ نتيجة لتقلص ألياف العضلات. وليس غريباً أن تسمح هذه الظاهرة بتحليل فيزيولوجية العضلات بما فيها القلب؛ ومرضيتها وبعض أشكال الاتصال بين الحيوانات بشكل أفضل.

لاحظ ولاستون Wollaston، وهو فيزيائي وكيميائي وطبيب بريطاني، في عام 1810، بالاعتماد على سماعة بدائية أن تواتر الأزيز الذي تحدثه العضلات يقدر بنحو 23 Hz مهما تكن أبعادها، كما لاحظ أن شدة الصوت الصادر لا تتعلق بشدة القوة المطبقة، ما لم تكن هذه القوة كبيرة جداً، فيصبح الصوت في الحالة الأخيرة أكثر حدَّة.

16.6.1. قياس الأصوات العضلية

إن سمّاعة الصدر التقليدية، وهي الأداة الأكثر استخداماً في الإصغاء إلى أصوات العضوية، لم تسهم على الإطلاق في دراسة أصوات العضلات، فهي تسمح بالكشف عن الأصوات التي تقع تواتراتها بين25Hz و200 Hz، كالنفخة القلبية أو الحشرجات الرئوية وتستبعد الأصوات التي تقل عن50 Hz. فضلاً عن كون الأصوات ذات التواترات المنخفضة التي تعبر السماعة غير مسموعة، إذ إن حساسية الأذن البشرية تنخفض عند التواتر 25 Hz إلى10% من قيمتها في حالة التواتر 250 Hz. أما التواتر 20 Hz، فإنه يشكل عتبة الاستماع لدى الإنسان في رأي معظم مختصي السمع، ولو أن الصوت يفقد طابعه عند التواترات التي تقل عن40 Hz ويوصف بالشخير.

16.6.2. سماعة الصدر الإلكترونية

وهي أداة ممتازة للتغلب على العقبات المذكورة، وتتكون أساسياً من مكروفون يقوم بدور ترجام يحوّل أمواج الضغط (كالأمواج التي تحمل الصوت إلى الأذن) إلى إشارات كهربائية، ويتكون الترجام في أغلب السماعات الإلكترونية من بلورة كهرضغطية تحوّل اهتزازات الضغط مباشرة إلى تيار كهربائي.

إن استجابة الترجام الجيد يجب أن تكون متجانسة من أجل التواترات كلّها حتى1000 Hz ولهذا تقوم الدارات الإلكترونية الموصولة بالترجام بتعديل استجابة البلورة وتضخيم الأصوات ضمن مجال معين من التواترات بحيث تشمل الأصوات العضلية الواقعة بين15Hz و100 Hz، ثم تحويل الإشارة الناتجة إلى إشارة صوتية أو إلى إشارة ضوئية يمكن تمثيلها على شاشة راسم اهتزاز مثلاً.

تتفوق السماعة الإلكترونية على السماعة الميكانيكية ببعض المزايا، ولكن عيبها أنها لا تضخم الأصوات العضلية فحسب، بل ضجيج الخلفية أيضاً الناجم عن المكيفات أو السيارات أو حتى وقع الخطا، والذي يصعب التخلص منه. ذلك أن تواتر الأمواج الصوتية يتناسب عكسياً مع طولها الموجي، كما أن أبعاد المرشح اللازم لإيقاف موجة صوتية تزداد مع تزايد الطول الموجي، ولهذا فإن الأطوال الموجية القصيرة الموافقة للأصوات الكلامية وأصوات كل من الطيارات النفاثة وصافرات البوليس يمكن أن تمتصها مواد البناء بسهولة. وأما الأطوال الموجية الموافقة للتواترات التي تقل عن1000 Hz فحذفها أكثر صعوبة، إذ إن الطول الموجي لصوت تواتره 200 Hz مثلاً يقدر بنحو 150mمتراً ويحتاج إلى مرشح بحجم مبنى كبير لمنعه من بلوغ السماعة الإلكترونية.

ولتعذر عزل المكروفون عن هذه الأصوات الطفيلية ذات التواترات المنخفضة، فإن الإشارة التي تخرج من السماعة تتضمن مركبة عشوائية بالإضافة إلى صوت العضلة، يطلق عليها اسم (الضجيج).

16.6.3. تابع الربط الذاتي

للتخلص من هذا الضجيج يمكن اللجوء إلى طريقة رياضية بالاعتماد على تابع الربط الذاتي autocorrelation. وهي تعتمد على مقارنة إشارة معينة مع نفسها بعد تأخيرها ... وفي هذه الحالة تظهر المعلومات المفيدة في هذه الإشارة على شكل تغير منتظم يتكرر مع الزمن بشكل يتفق مع أمواج الضغط الموافقة للصوت الذي تحدثه العضلات، في حين أن ضجيج الخلفية لا يبدي مثل هذا الانتظام.

وإن هذه الطريقة لإظهار الأصوات العضلية تدل على أن الصوت الذي تصدره عضلة معينة ليس صوتاً نقياً، بل يتركب من عدة تواترات. وإن طيف هذا الصوت المركب يتعين بكثافة الطاقة التي يحملها كل تواتر من التواترات، وهو يبدي نهاية عظمى عند التواتر (25 ± 2.5)Hz .

16.6.4. طيف الإصدار في الزمن الحقيقي

إن حساب طيف الإصدار في الزمن الحقيقي لأي أداة يجري حالياً بالاستعانة ببرنامج يعتمد على خوارزمية تحليل فورييه السريع Fast Fourier Transform ويؤدي إلى تخفيض مدة الحساب بنحو مئتي مرة.

وقد نجم عن تحويل فورييه السريع تقدم هائل في عدد كبير من المجالات العلمية، ونحصل باستخدامه على الطيف الدقيق لأصوات العضلات وليس على تقريب له كما في تابع الربط الذاتي. وعندما يوصل الجهاز القادر على تحويل فورييه بالسماعة الإلكترونية، فإن الطيف الصوتي يبرز من الجهاز في الزمن الحقيقي ودون تأخير ملحوظ بالنسبة إلى التقلص العضلي.

وقد جرت دراسة للأصوات الصادرة عن مختلف العضلات، وقد وجد لدى دراسة لإصدار العضلات ذات الرأسين في ساعد لشخص معين بتطبيق مكروفون السماعة الإلكترونية على هذه العضلة وهو يحمل في يده ثقلاً رصاصياً وراحته تتجه نحو الأعلى، بأن شدة الصوت الصادر تتناسب طرداً مع الثقل، وأن هذه الشدة تكون صغرى في الحالة التي يصنع فيها الساعد الزاوية 115^{o} مع الذراع، وإن الربّاعين يعرفون منذ زمن طويل بأن هذه الزاوية هي التي تسمح برفع الأثقال الأكبر. كما وجد لدى دراسة العضلة التَوْءَمِيّة وهي أكبر عضلات ربلة الساق أنها لا تصدر عملياً أي صوت في وضعية القرفصاء، وتصدر في وضعية الوقوف صوتاً قوياً نسبياً، ويصبح قوياً جداً في حالة الوقوف على رؤوس الأصابع. وقد وجد أن شدة الصوت الذي تصدره هذه العضلة في الحالة الأخيرة تعادل شدة الصوت الذي يصدر عن الساعد في أثناء حمل ثقل يقدّر بنحو سبعة كيلو غرامات، كما أن إصدار العضلة التَوْءَمِيّة لدى الراقصات المحترفات لدى وقوفهن على رؤوس أصابعهن هو أشد منه لدى الذكور، كما أكدت هذه الدراسات أن شدة الصوت العضلي تدل على هوية العضلات التي تعمل في أثناء التمرين الفيزيائي.

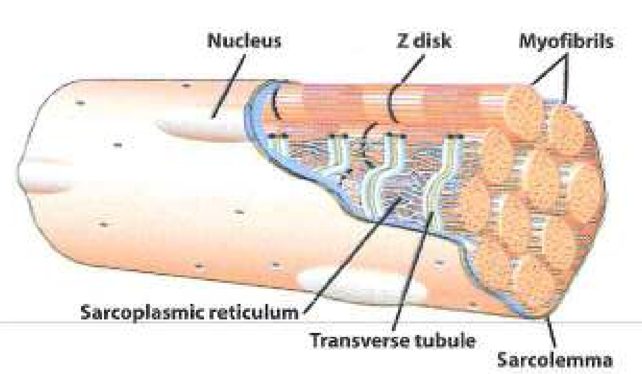
وأما العضلة النعلية، وهي إحدى عضلات الساق القريبة من العضلة التَوْءَمِيّة، فقد درست في وضعية الوقوف، ووجد أن إصدارها أشد من إصدار العضلة التَوْءَمِيّة بعشر مرات. وإن شدة إصدار هذه العضلة تنجم عن فيزيولوجيتها وعن دورها في التنقل، وهي تعمل في وضعية الوقوف وتحافظ على الزاوية بين الساق والقدم.

تتقلص العضلة النعلية غالباً دون تعب ولفترات طويلة خلال وضعية الوقوف أو المشي أو العدْو. وأما العضلات الهيكلية الأخرى فتتعب بسهولة، وإن المردود الطاقي للعضلة النعلية أفضل بكثير منه للعضلات الأخرى، وقوة احتمالها ينجم عن غناها بالمتقدّرات وهي المتعضيات الخلوية التي تحوّل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية عن طريق الإنظيم أكسيداز الذي يحرر الأدينوزين الثلاثي الفوسفات ATP الذي يعدُّ الوقود الخلوي العام.

إن الألياف العضلية الغنية بالمتقدّرات هي ألياف تتقلص ببطء، وأما الألياف الأفقر بالمتقدرات والقادرة على التقلص بسرعة فتدعى ألياف التقلص السريع. ومن الواضح أن ألياف التقلص البطيء تتميز بدور مهم في تمارين الاحتمال وألياف التقلص السريع في تمارين السرعة. إن العضلة النعلية التي تحوي بخاصة الألياف البطيئة هي أكثر نمواً لدى أبطال الجري الطويل منها لدى أبطال الجري القصير أو الوثب العالي، ذلك أن بطل الجري القصير أو الوثب العالي لا يتطلب نشاطاً من قبل العضلة النعلية. يمكن إذا تقدم المشترك في الجري الطويل أن تصبح شدة الصوت الذي تصدره عضلته النعلية قريبة منها في حالة الصوت الذي تصدره عضلته التَوْءَمِيَّة.

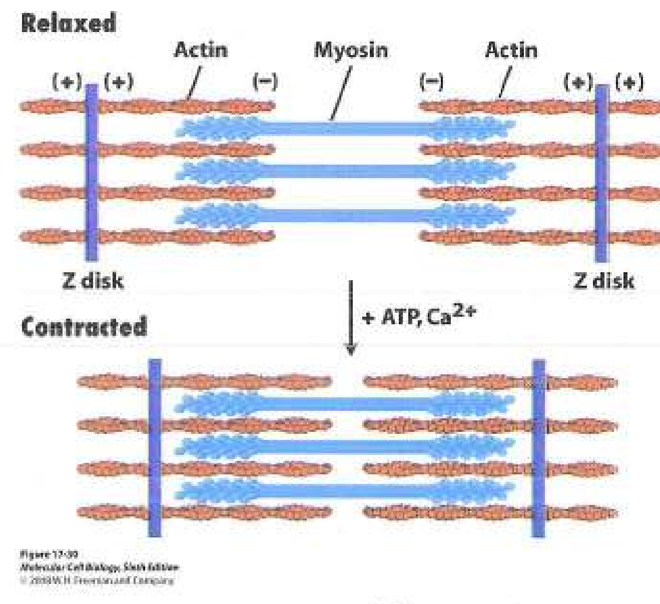
16.6.5. آلية إصدار الأصوات

يتألف الليف العضلي من حزم من الليبفات التي تتكون كل حزمة منها من مجموعة من الليبفات الدقيقة (وهي بروتينات أكتينية) ومن الليبفات الثخينة (وهي بروتينات ميوزينية). وفي أثناء التقلص العضلي تنزلق الليبفات الأكتينية على طول الليبفات الميوزينية الأمر الذي ينجم عنه قصر الليف العضلي (الشكل16.8a).



الشكل16.8a.

تنشأ الأصوات العضلية من نشاط الألياف العضلية العنصرية ولاسيَّما (لا حصراً) ألياف التقلص السريع. تستغرق استجابة هذه الألياف نحو40 ميلي ثانية أي1/25 من الثانية، وهي مدة تنسجم إجمالاً مع دورة الأدينوزين الثلاثي الفوسفات (ATP) – أي استهلاك (ATP) وتوليده – الذي ينظم التفاعلات الكيميائية التي تتحكم بالتقلص العضلي. ومما يلفت الانتباه أن دورة الأدينوزين تقابل دوراً كاملاً لتواتر الصوت الذي تصدره العضلة أي25Hz.



الشكل16.8b.

الفصل السابع عشر

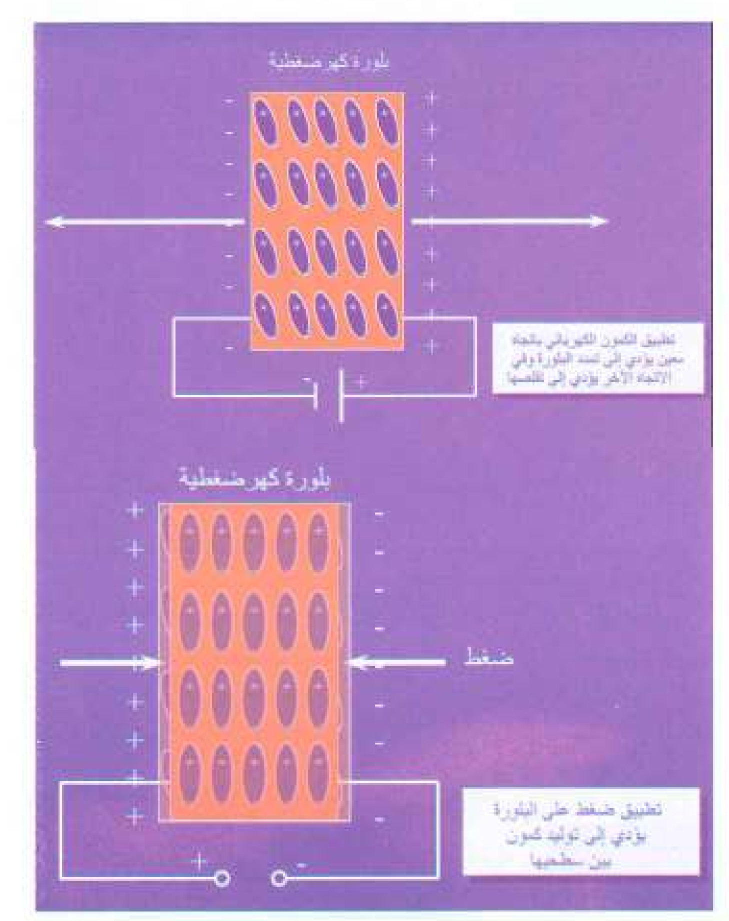
التصوير بالصدى

Echography

يمكن "بإنارة" الجسم بالأمواج فوق الصوتية، الحصول على صور لبنيته الداخلية، إما عن طريق الموجة التي تنفذ منه، وإمّا عن طريق الأصداء التي ترتد عنه echography. تشكل هذه الصور نصراً طبياً عظيماً، ذلك أن الأمواج فوق الصوتية تخترق النسج الحيوية، وتسمح باستكشاف الجسم البشري من دون إلحاق أي ضرر به. وأصبح بإمكان الطبيب حالياً تحديد موقع ورم معين في الجسم، وأن يكشف النقاب عن وجود الأجربة، وأن يراقب الحمل من دون خطر على العضوية.

17.1. توليد الأمواج فوق الصوتية

يمكن توليد الأمواج فوق الصوتية ببلورات كهرضغطية piezoelectricity (أي تحول الإشارة الكهربائية إلى إشارة ضغطية، أي صوتية وبالعكس)، تحضَّر هذه البلورات من مواد سراميكية كالكوارتز quartz (وهو ثاني أكسيد السلكون). فعندما يطبق توتر كهربائي متناوب بين سطحي هذه البلورة تتغير ثخانتها زيادة ونقصاناً، فتترافق بتوليد موجة صوتية، الأمر الذي يجعل الاهتزازات الكهربائية تتحول إلى اهتزازات ميكانيكية. يمكن التحكم بتواتر هذه الاهتزازات بجعل ثخانة البلورة الكهرضغطية تساوي نصف أو ربع الطول الموجي الموافق (الشكل17.1) وليكون المردود أعظمياً محققاً التجاوب.



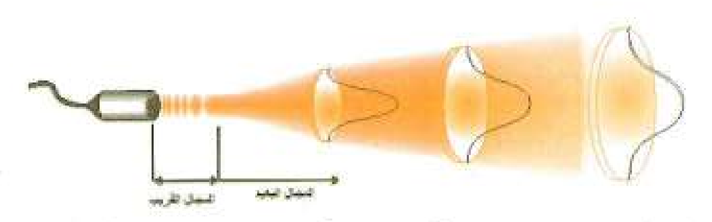
الشكل17.1. البلورة الكهرضغطية وتغير ثخانتها بالتوتر الكهربائي.

وعندما ترد على البلورة الكهرضغطية موجة فوق صوتية (ميكانيكية) تتحول هذه الأخيرة إلى توتر كهربائي. تدعى هذه البلورة بالترجام transducer لأنها تترجم الإشارة الكهربائية إلى ميكانيكية وبالعكس. يجب أن تضبط ثخانة البلورة الكهرضغطية بحيث تساوي تقريباً ربع الطول الموجة التي يجب توليدها.

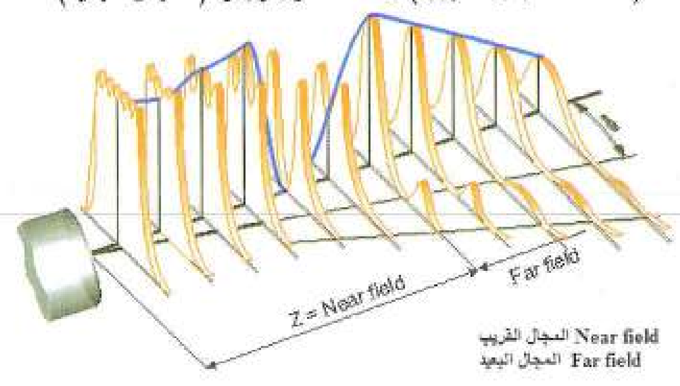
17.2. المجس الباعث _ المستقبل

وهو المكوّن الأساسي في راسم الصدى، ويضم طرفه الموجّه نحو المنطقة المدروسة ترجاماً كهرضغطياً كما يضم عناصر أخرى (الشكل17.2). تدرس الأمواج الصادرة بطريقة الأمواج العامة للحصول على صدور الموجة الجديدة من صدور الموجة السابقة لها وفق مبدأ هويغنز. لكن المسألة تقرّب عادة بمنطقتين: صدور الموجة القريبة من المنبع التي غالباً ما يكون لها شكل المنبع، فتسمى منطقة فرنل أو منطقة الحقل القريب وفيها تكون الشدة سريعة التغير، وصدور موجة بعيدة تبدأ بالانفراج بسبب الانعراج، فتسمى منطقة فراونهوفر أو منطقة الحقل البعيد وتكون الشدة متغيرة عكسياً مع البعد (الشكل17.3). ويعتمد جودة هذا التقريب على طول الموجة وقطر فتحة المجس.

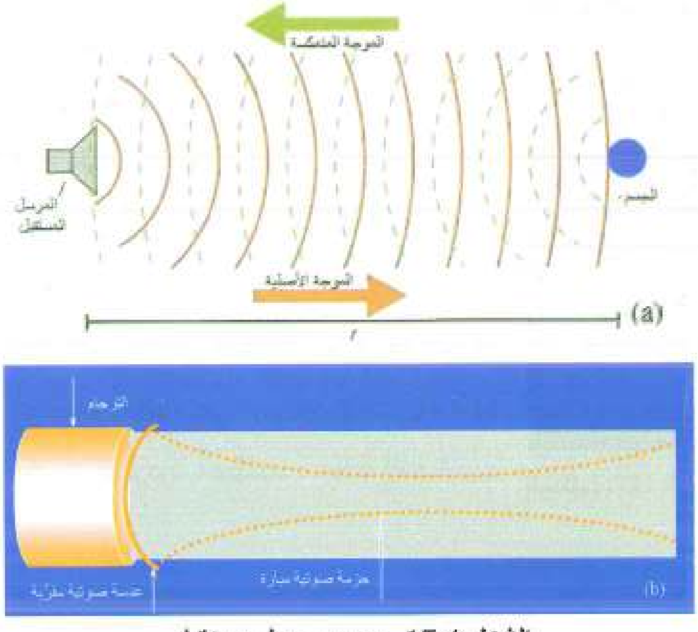
و لانفراج الحزمة الصادرة من المجس (الشكل17.4a) فلا بد من وجود عدسة مقربة في المجس بعد البلورة الكهرضغطية مباشرة لتقريب الحزمة (الشكل17.4b).



الشكل17.2. تقريب دراسة انتشار الأمواج الصادرة: منطقة فرينل (منطقة المجال القريب) ومنطقة فراونهوفر (المجال البعيد).



الشكل 17.3. تخامد الموجة الصادرة من المجس بدلالة البعد



الشكل 17.4. مجس مرسل مستقبل

وقد يكون الترجام مؤلفاً من صفيف من العناصر الكهرضغطية بهندسة تناسب منطقة الفحص كما في الشكل17.5a. ويظهر في الشكل17.5b,c إمكان توجيه الحزمة إلكترونياً بالتحكم بأطوار إصدار الموجة من كل عنصر من عناصر المجس ما يمكّن من توجيه الحزمة باتجاه معين (b) أو تبئير الحزمة (c). إن التحكم في التفعيل إلكترونياً يعطي مرونة إضافية لاكتشاف أجزاء مختلفة من العضو. وتستعمل عناصر المجس باعثاً ومستقبلاً في الوقت نفسه لذلك يكون عمل المجس نبضياً.

يتميز المجس بخاصتين أساسيتين هما **المقدرة الفاصلة المحورية (وفق محور الحزمة):** وتتعين المقدرة الفاصلة المحورية بإمكان التمييز بين جسمين قريبين أحدهما من الآخر مسافة تقدّر ببضعة أضعاف الطول الموجي، وهي بذلك في حالة التواترات العالية أفضل منها في حالة التواترات المنخفضة.

(a)



مجسات مختلفة مركبة من بلورات كهرضغطية مصطفة بهندسات مختلفة.

(b)



(c)



الشكل17.5. توجيه الحزمة إلكترونياً بالتحكم بأطوار إصدار الموجة من كل عنصر من عناصر المجس ما يمكن من توجيه الحزمة باتجاه معين (b) أوتبئير الحزمة (c).

وعليه تتأثر هذه المقدرة الفاصلة بامتصاص الوسط سواء في الذهاب أو الإياب.

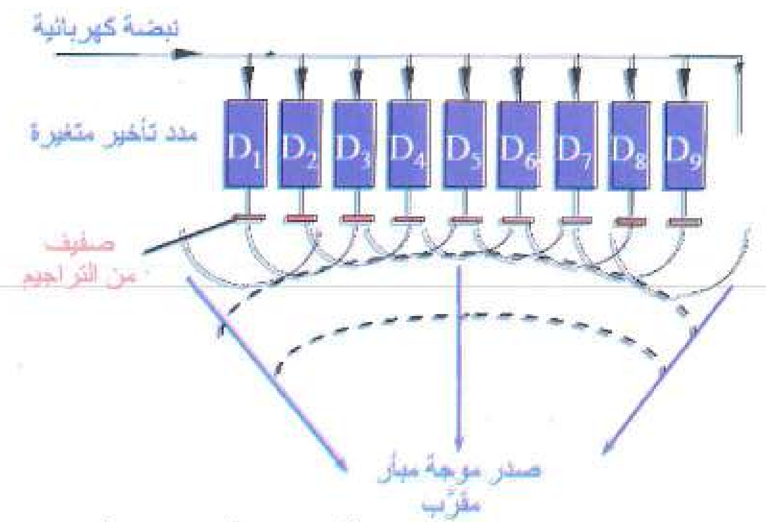
المقدرة الفاصلة العرضانية (وفق محور يتعامد مع محور الحزمة): فيؤدي قطر الحزمة الدور الأساسي في تحديد دقة معلومات صورة الصدى؛ إذ يؤدي اتساع فتحة الحزمة مع العمق إلى إضعاف المقدرة الفاصلة تدريجياً، الشكل 17.4b، لذلك تستعمل بعض العدسات الصوتية لتبئير الحزمة.

تبئير الحزمة

يمكن تصحيح تباعد الحزمة، في حالة ترجام وحيد، بإلصاق عدسة صوتية بالبلورة الكهرضغطية (الشكل17.4b) فنحصل على مجس مبأر. ومن الجدير بالذكر أنه يمكن الحصول على عدسات فوق

صوتية تشبه العدسات الضوئية تماماً من أوساط تختلف فيها سرعة الصوت كثيراً عنها في الوسط القياسي. ويستخدم في الصوتيات مواد ينتشر فيها الصوت على الأغلب بسرعة تزيد على سرعته في الماء كالبليكسيغلاس plexiglass مثلاً، في حين تكون العدسات الضوئية مقطوعة من أوساط تكون سرعة انتشار الضوء فيها أبطأ منها في الهواء. وبناءً على ما تقدم تكون عدسة البليكسيغلاس السميكة الحواف والرقيقة في مركزها، مقربة، فيوافق شكلها بذلك العدسة الضوئية المبعِّدة. تتعلق خصائص المنطقة التي تتجمع فيها الطاقة الصوتية بعدة وسطاء: كنصف قطر انحناء العدسة وأبعاد البلورة الكهرضغطية وتواترها الصادر. هذا وإن تحقيق أفضل مقدرة فاصلة عند عمق معين مرهون باختيار المجس ذي البعد المحرقي الموافق.

أما في حالة مجس يتكون من شبكة تراجيم خطية، فيمكن تبئير الموجة فوق الصوتية لدى إصدارها أو استقبالها بتلك الشبكة بالاعتماد على خطوط تأخير إلكترونية. فالموجة الواردة إلى شبكة التراجيم من البؤرة focus (الشكل17.6) تبلغ الترجام المركزي أولاً ثم التراجيم المجاورة بتأخير قصير. لهذا فإن الإشارة



الشكل 17.6. تبئير الحزمة بإضافة عناصر تأخير كهربائية.

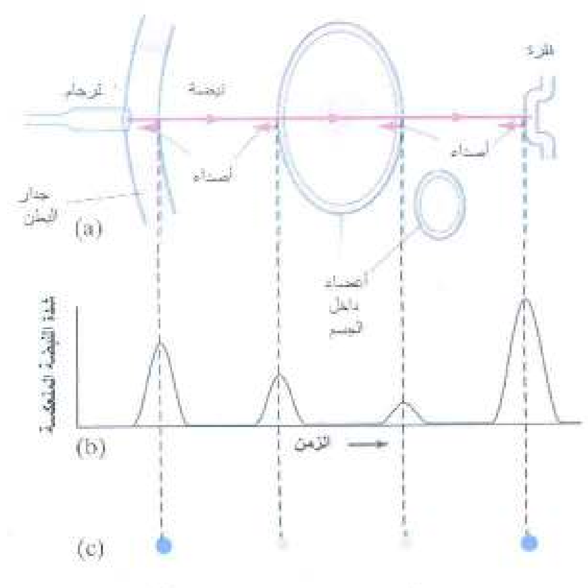
الكهربائية التي تنشأ عند الترجام المركزي ستخضع إلى أطول تأخير، بينما تقل مدد تأخير الإشارات الناجمة عن التراجيم الأخرى شيئاً فشيئاً بحيث تصل سائر الإشارات في آن واحد إلى دارات الاستقبال حيث ينضم بعضها إلى بعض. وبذلك تكون الإشارة عظمى عندما تصدر الموجة أو تستقبل عند البؤرة. إذ يقوم مجمل خطوط التأخير بدور عدسة تقليدية.

17.3. مبدأ تصوير الصدى

بتطبيق نبضة فوق صوتية من ترجام أحادي البلورة على البطن المطلي بمادة الجيل لتسهيل نفوذ النبضة داخل الجسم، ينعكس جزء منها وينفذ الجزء الباقي كلما التقت سطحاً يفصل بين نسيجين مختلفين في الممانعة الصوتية (راجع الفصل15). يتم استقبال الأصداء المنعكسة بالترجام نفسه الذي يولد الموجة الصادرة (الشكل17.5a). إذ تصل الأصداء القادمة من السطوح الأقرب للمجس قبل الأصداء القادمة من السطوح الأبعد. في الشكل17.5b رسم للأصداء بدلالة الزمن الذي يدل على لحظة وصولها المجس.

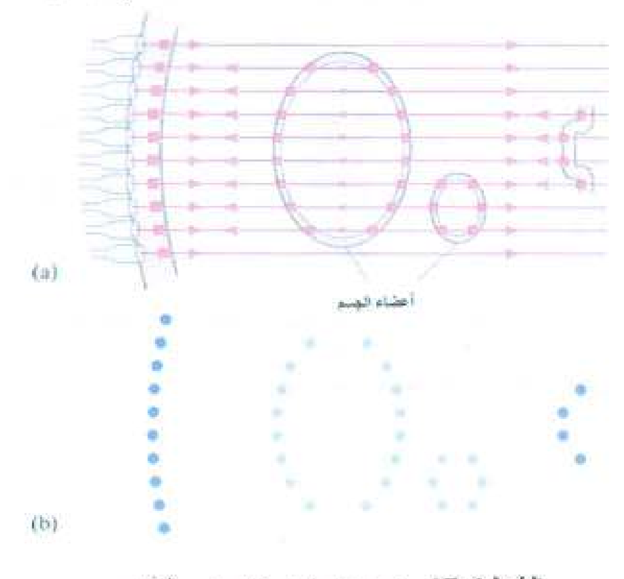
تدل الخطوط الشاقولية المنقطة على التقابل بين النبضات المنعكسة والسطوح التي تم الانعكاس عنها. وفي الشكل17.5c تجد عرضاً نقطياً للأصداء نفسها: حيث تتعلق إضاءة كل نقطة بشدة الإشارة.

يتضمن الشكل13.6 مسح عشرة خطوط في البطن تم الحصول عليها إما بتحريك ترجام واحد وإمّا باستخدام عشرة تراجيم دفعة واحدة.



الشكل17.5. مبدأ تصوير الصدى بمجس أحادي البلورة.

تم رسم الأصداء على شكل نقاط لتوليد الصورة. تعطي الآثار الأكثر قرباً فيما بينها صوراً أكثر تفصيلاً. تجد في الأشكال17.7a,b.c صورة للجنين في الرحم.



الشكل17.6. مسح مستوي بتصوير الصدى.

يجب أن يؤخذ في الحسبان عاملان لدى اختيار تواتر الموجة فوق الصوتية:

- أصغر تفصيل يرغب بتمييزه، تبعاً لقوانين الانعراج، أي إن المقدرة الفاصلة لنظام ما (ضوئي أو صوتي) هي من مرتبة الطول الموجي، ولهذا يستخدم طول موجي قصير للحصول على صورة أكثر تفصيلاً أي يستخدم تواتر مرتفع.
- تزايد امتصاص وسط ما للطاقة فوق الصوتية من جهة أخرى، تزايداً سريعاً مع ارتفاع تواتر الموجة الصوتية.

في التطبيقات الطبية، تستخدم عملياً تواترات من مرتبة بضعة ميغا هرتز كتسوية بين العاملين المتناقضين.

17.4. تخامد الحزم الصوتية

تتخامد الطاقة المحمولة بالحزمة الصوتية مع الابتعاد التدريجي عن المجس الباعث وفق تابع أسي.



الشكل17.7a.

أخرى. وقد كانت أجهزة التصوير الأولى تعمل بالمسح اليدوي، ولبطء اقتناء المعطيات بمثل هذه الجملة، فقد وقع الخيار على أجهزة المسح الآلي والسريع، فظهرت تقانات المسح الميكانيكي أو الإلكتروني أو كليهما القادرة إلى إعطاء مقاطع بمعدل عشرة إلى خمسين مقطعاً في الثانية (بحسب كثافة الخطوط وعمق الاستكشاف).

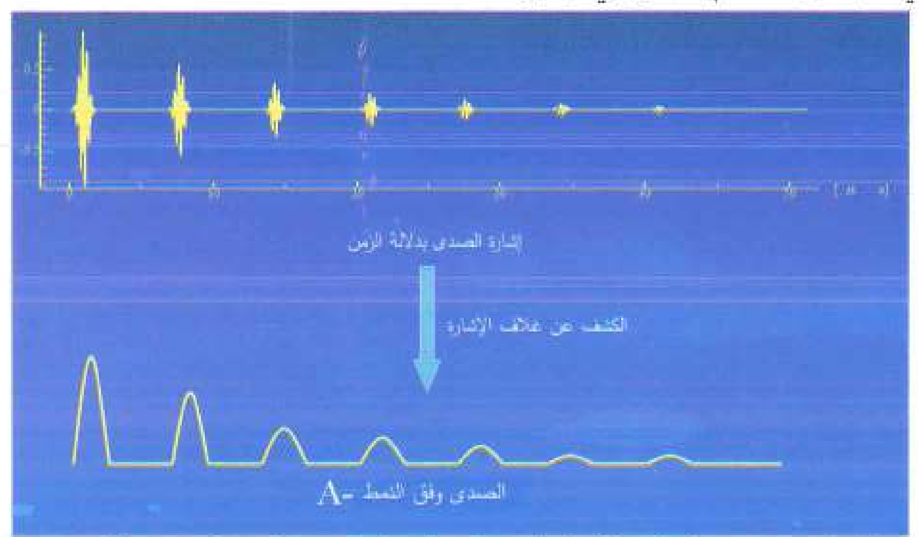
وإن رواسم الصدى الحديثة، التي تعتمد على سلم الرماديات في إظهار الصور في الزمن الحقيقي التي فتحت نافذة على تنظير الجسم بشكل مأمون بالصدى echoscopy كانت نقطة تحوّل في طب التوليد وفي طب القلب وفي جزء كبير من أمراض البطن والحوض. لكن تعذر استخدام هذه الطريقة في إظهار الدماغ (عدا دماغ الأطفال دون السنتين) والرئة، بالإضافة إلى الصعوبة المعهودة في تفهم الصور القطاعية غير المثالية التي لم يطرأ عليها أي تحسن، يحدّ من استخدامها.

17.6. الأنماط المختلفة لدراسة صورة الصدى

لصورة الصدى عدة أنماط ولكل منها أهميته وذلك بحسب الفحص الذي يجري على الفرد: منها النمط المطالي **Amplitude A** ومنها نمط السطوع **Brilliance B** ونمط الحركة بدلالة الزمن **Time Movement T-M**.

17.6.1. تصوير الصدى A أو تمثيل الاتساع بدلالة الزمن

وهو تمثيل لسعة النبضة المنعكسة الصوتية للحزمة فوق الصوتية عن الانقطاعات التي تقابلها بدلالة الزمن (ومِنْ ثَمّ العمق) (الشكل 17.10). تستخدم هذه التقانة في قياس البعد بين بنيتين: كثخانة القرنية وامتداد العين وموقع الخط الناصف للدماغ، وقد تم الاستغناء تدريجياً عن هذه التقانة لصالح تصوير الصدى الثنائي البعد، باستخدام مجس في بعدين.



الشكل17.10. تمثل في هذا الشكل مختلف أشكال الصدى في بنية متجانسة كالكبد

17.6.2. تمثيل الصدى وفق النمط B

يمكن باستعمال مضخمات مناسبة تحويل سعة النبضة المنعكسة إلى شدة نبضة، ومِنْ ثَمّ تسهل رؤية التباين بين الأجزاء المختلفة في الصورة والتحكم في هذا التباين.

17.6.3. تصوير صدى الحركة بدلالة الزمن T-M

يستعمل هذا التصوير عند الحركة وإدخال معامل الزمن في معالجة الصورة، إذ تمثل مختلف الأصداء، في هذا النمط من الاستكشاف، بدلالة العمق على شكل نقاط مضيئة تكون أكثر سطوعاً بقدر ما تكون الطاقة المنعكسة أكبر (كالتمثيل في النمطB). فعندما يستخدم كاشف موجه نحو البنى القلبية مثلاً، تبتعد أصداء البنى المتحركة عن الكاشف أو تقترب منه في كل دورة قلبية. وإن انسحاب هذا الخط التمثيلي للأصداء بسرعة ثابتة موازياً لنفسه يؤدي إلى إظهار انتقال البنى التي تعترض الحزمة فوق الصوتية بدلالة الزمن. وإن هذا التمثيل الذي يدعى تمثيل الحركة بدلالة الزمن (T–M) كثير الشيوع في القلبية لدراسة انتقال الصمامات القلبية وحركية الجدر البطينية. فالبنى الثابتة تمثل بمستقيمات موازية لمحور الزمن عند العمق الموافق، في حين يعطي كل جدار متحرك رسماً يمثل حركته بدلالة الزمن.

17.7. الأمواج فوق الصوتية العالية الشدة المبأرة والتطبيقات الطبية

الأمواج فوق الصوتية العالية الشدة المبأرة High intensity focused ultrasound (HIFU أو أحياناً MRgFUS التي تعني الأمواج فوق الصوتية المبأرة الموجهة بالتجاوب المغنطيسي) طريقة طبية يطبق فيها طاقة فوق صوتية مبأرة عالية الشدة لتسخين النسيج المريض أو التالف موضعياً وتحطيمه من خلال الاستئصال.

إن تقنية HIFU هي معالجة فرط حرارية hyperthermia therapy، وهي صنف من المعالجات السريرية التي تستخدم الحرارة في معالجة الأمراض. والـ HIFU هي شكل أيضاً من أشكال المعالجة بالأمواج فوق الصوتية، تتضمن طرائق لاهجومية أو هجوميتها في حدها الأدنى في توجيه الطاقة الصوتية نحو الجسم. ثمة طرائق أخرى بالإضافة إلى HIFU تتضمن سوق الدواء بالاستعانة بالأمواج فوق الصوتية، كوقف النزف بالأمواج فوق الصوتية ultrasound hemostasis وتفتيت الحصى بالأمواج فوق الصوتية وتحطيم الخثرات thrombolysis بالاستعانة بالأمواج فوق الصوتية.

تجري إجراءات الـ HIFU السريرية في الحالة النموذجية بالتزامن مع إجراء تصوير لتمكين التخطيط للمعالجة واستهدافها قبل تطبيق مستويات علاجية أو استئصالية من الطاقة فوق الصوتية. عندما يستخدم تصوير التجاوب المغنطيسي MRI في التوجيه، تدعى التقنية أحياناً الأمواج فوق الصوتية المبأرة

والموجهة بالتجاوب المغنطيسي Magnetic Resonance guided Focused Ultrasound وغالباً ما تختصر على الشكل MRgFUS أو MRgHIFU.

تستخدم التطبيقات العلاجية الأمواج فوق الصوتية لإحداث الحرارة أو التهيج في الجسم. ولذلك تستخدم طاقة أعلى بكثير منها في حالة الأمواج فوق الصوتية التشخيصية. كما إن مجال التواترات المستخدمة في كثير من الحالات شديدة الاختلاف.

يمكن استخدام المنابع فوق الصوتية في توليد التغيرات الحرارية والميكانيكية الموضعية في النسيج الحيوي كما في المعالجة المهنية occupational therapy والمعالجة الفيزيائية ومعالجة السرطان. غير إن استخدام الأمواج فوق الصوتية في معالجة حالات العضلات الهيكلية musculoskeletal conditions لم يعد مقبولاً.

يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية المبأرة في توليد تسخين شديد التوضع في معالجة الكييسات cysts والأورام الحميدة والخبيثة بتقنية (MRgFUS) أو الأمواج فوق الصوتية المبأرة العالية الشدة (HIFU). تستخدم هذه الإجراءات عموماً تواترات أخفض منها في حالة التصوير الطبي التشخيصي بالأمواج فوق الصوتية (من 0.250 إلى 2MHz)، ولكن بطاقات أعلى بكثير.

يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية المبأرة في تحطيم حصى الكلية بتفتيت الحصى lithotripsy.

يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية في معالجة السادات cataract عن طريق استحلاب العدسة phacoemulsification.

اكتشفت مفعولات فيزيولوجية إضافية للأمواج فوق الصوتية المنخفضة الشدة كإمكانيتها في تحريض نمو العظام، وإمكانيتها في تمزيق الحاجز الدموي الدماغي لسوق الدواء.

الفصل الثامن عشر

مفعول دوبلر وقياس سرعة الدم

Doppler Effect

نهدف من هذا الفصل إلى التعريف بمفعول دوبلر أو انزياح دوبلر Doppler shift وكيفية توظيفه في قياس تدفق الدم والكشف عن حركة صدر الجنين ومراقبة حركاته القلبية. اكتشف مفعول دوبلر في الأمواج الصوتية أولاً، فقد لوحظ تغير تواتر موجة صوتية عندما يكون لمنبع الصوت حركة نسبية بالنسبة إلى مراقب فيسمع عند الاقتراب موجة بتواتر أعلى من تواتر المنبع، ويسمع عند الابتعاد موجة بتواتر أخفض من تواتر المنبع، أي حدوث انزياح في تواتر الموجة. ويفسر ذلك نتيجة تغير سرعة انتشار الموجة في الوسط (الهواء) في الحالتين. وتبين فيما بعد أن هذه السمة عامة لجميع الأمواج المادية والكهرطيسية، مع أن الأمواج الكهرطيسية لا تحتاج إلى وسط في انتشارها في الحالة العامة؛ ويعود السبب في ظهور مفعول دوبلر للأمواج الكهرطيسية إلى ثبات سرعة الضوء في الجمل العطالية أي إلى النسبية الخاصة.

نستهل هذا الفصل بالتمييز بين التداخل المكاني الذي يحدث بين موجتين لهما التواتر نفسه، لكن قطعتا مسافتين مختلفتين حتى الوصول إلى نقطة التداخل؛ والتداخل الزماني الذي يحدث بين موجتين متقاربتين بالتواتر، فيظهر تأثير الفرق في المدد الزمنية حتى لحظة وصولهما إلى نقطة التداخل، وتحدث ظاهرة يطلق عليها اسم الخفقان beats. تكمن أهمية الخفقان في حالتنا في إحداث التداخل بين موجة طرأ عليها انزياح في التواتر لدى انعكاسها عن هدف متحرك كخلايا الدم الحمراء والموجة الأصلية. إذ تنبئنا نتيجة التداخل بسرعة خلايا الدم. نتناول بعد ذلك العلاقات التي تعبر عن مفعول دوبلر وكيفية استخلاص ذلك مع تطبيقات أخرى له.



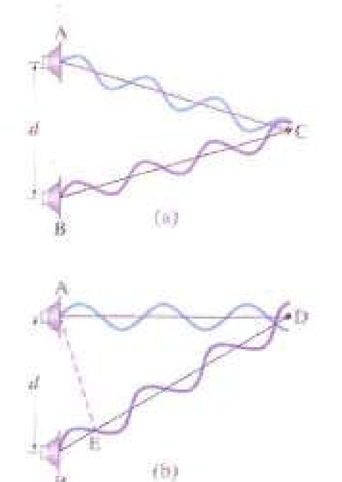
الشكل18.1. تداخل الأمواج الصوتية الصادرة من مكبرين للصوت.

18.1. التداخل

هناك نوعان من تداخل الأمواج، التداخل المكاني كتداخل موجتي شقي يانغ اللتين يحكمهما فرق المسير المكاني(AC-BC) أو (AD-BD)، أو موجتين تصدران من مكبرين للصوت وكلاهما له التواتر نفسه (الشكلان18.1

و18.2)، أو تداخل أمواج شبكة الانعراج. كما يمكن للأمواج أن تتداخل زمانياً، ويحكم التداخل في هذه الحالة الزمن التي تستغرقه الموجتان حتى الوصول إلى نقطة التلاقي، وهذا ما يحدث عندما تكون الموجتان المتداخلتان متقاربتين في التواتر، فتحدثان ظاهرة الخفقان.

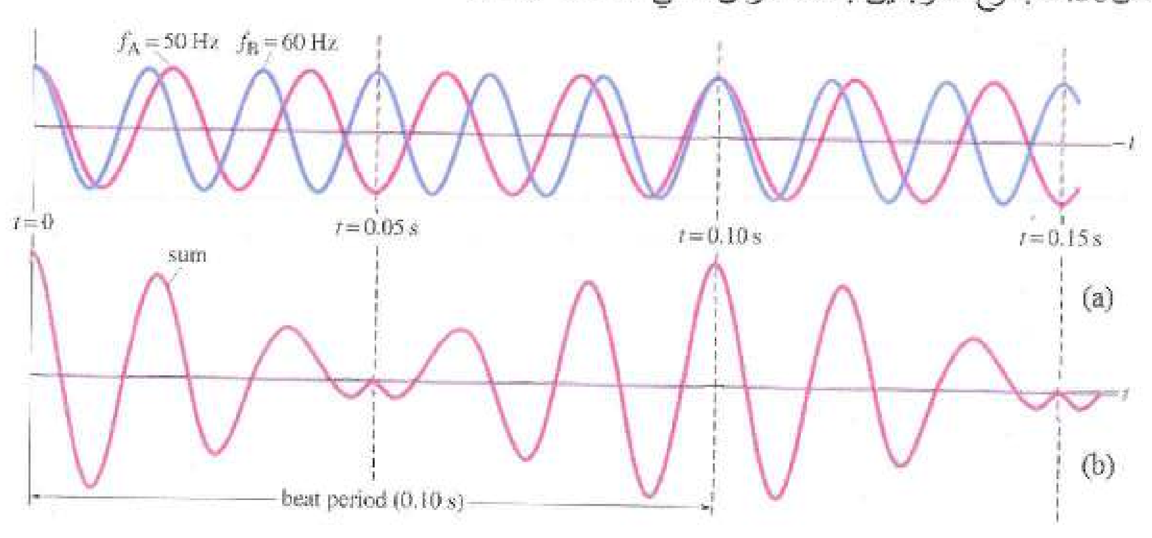
18.2. الخفقان، التداخل الزمني



الشكل18.2. موجتان صوتيتان لهما التواتر نفسه من مكبرين للصوت A وB (الشكل18.1) تتداخلان تداخلاً بنّاءً في C وتداخلاً هداماً في D. (لا يظهر هنا إلاّ التمثيلات البيانية، وليس الأمواج الصوتية الطولانية الحقيقية).

عندما يكون منبعان صوتيان ولنقل شوكتين رنانتين، لهما تواتران متقاربان، تتداخل الموجتان الصوتيتان من المنبعين إحداهما مع الأخرى. والمستوى الصوتي في موقع معين يرتفع وينخفض على التناوب مع الزمن، لأن الموجتين تكونان أحياناً في الطور نفسه وأحياناً متعاكستين في الطور بسبب اختلاف طوليهما الموجيين.

يطلق على تغيرات الشدة التي تفصل فيما بينها فواصل زمنية منتظمة الخفقات، وتدعى الظاهرة الخفقان. لرؤية كيفية ظهور الخفقات، ندرس موجتين صوتيتين متساويتين في السعة، وتواتراهما $f_A = 50\text{Hz}$ و $f_B = 60\text{Hz}$ على الترتيب. خلال $1.00s$، ينجز المنبع الأول 50Hz، بينما ينجز الثاني 60Hz. ندرس في هذه اللحظة الموجتين في نقطة معينة في المكان لها البعد نفسه عن المنبعين. يظهر في الشكل18.3a: شكل كل من الموجتين بدلالة الزمن، في نقطة ثابتة. يمثل الخط الأرجواني الموجة 50Hz، بينما يمثل الخط الأزرق الموجة 60Hz. يمثل الخط السفلي في الشكل3b: مجموع الموجتين بدلالة الزمن. ففي اللحظة $t = 0$،



الشكل18.3. حدوث الخفقان نتيجة لانضمام موجتين متقاربتين في التواتر

تنطلق الموجتان في الطور نفسه وإذا تداخلتا فستتداخلان تداخلاً بنَّاءً. ولأن الموجتين تهتزان بمعدلين مختلفين، فهما تصبحان في اللحظة $t = 0.05s$، متعاكستين تماماً في الطور وتتداخلان تداخلاً هداماً. وفي اللحظة $t = 0.10s$، تصبحان في الطور نفسه، والسعة المحصلة تكون كبيرة ثانية. ومِنْ ثَمَّ تكون السعة المحصلة كبيرة كل $0.10s$، وتهبط كثيراً بينهما. يسمع هذا الارتفاع والانخفاض في الشدة على شكل خفقات. يفصل بين الخفقات في هذه الحالة $0.10s$. وهذا يعني أن تواتر الخفقان $10Hz$. ينتج عن ذلك أن تواتر الخفقان يساوي الفارق بين تواتري الموجتين.

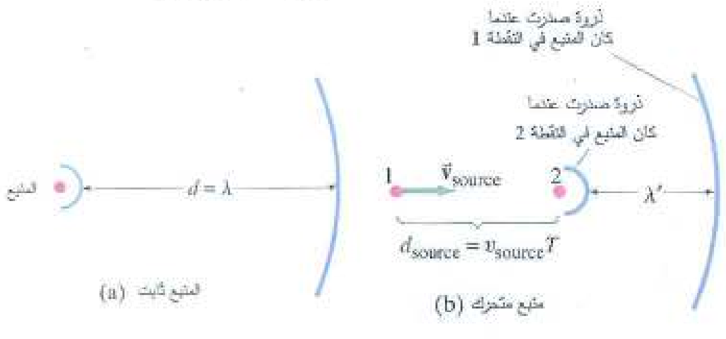
18.3. مفعول دوبلر

لعلك لاحظت تغير تواتر (حدة) صافرة سيارة الإطفاء أثناء ابتعادها عنك بسرعة وزمور (مزمار) سيارة أثناء اقترابها منك. كما يتغير تواتر ضجيج محرك سيارة لدى مرورها بمراقب. فعندما يكون المنبع مقترباً من المراقب، يدرك المراقب تواتراً أعلى مما لو كان المنبع ساكناً، وعندما يبتعد المنبع عن المراقب، يصبح التواتر أخفض. تعرف هذه الظاهرة بمفعول دوبلر Doppler effect وتحدث في حالة كل أنواع الأمواج. إنَ سبب حدوث هذه الظاهرة، وجود حركة نسبية بين المنبع والمراقب. لندرس صافرة سيارة إطفاء في حالة سكون بالنسبة للمراقب، تصدر صوتاً بتواتر خاص في كل الاتجاهات. وتنتشر الأمواج الصوتية بسرعة الصوت في الهواء v_{snd}،كما يظهر ذلك في صدور الموجة المنتظمة المتتالية المرسومة في الشكل18.4a وستصل المراقب بفواصل زمنية متساوية وسيسمع التواتر نفسه. أما إذا كان منبعنا، سيارة الإطفاء، يتحرك ستصدر الصافرة الصوت بالتواتر نفسه عندما كانت في حالة السكون. ولكن صدور الموجة الصوتية التي تصدرها في اتجاه حركتها تكون أكثر تقارباً فيما بينها مما عليه في حالة السكون، على النحو المبين في الشكل 18.4b.

(a) سيارة الإطفاء في حالة السكون

(b) سيارة الإطفاء في حالة الحركة

الشكل18.4. (a) يسمع المراقبان على الرصيف التواتر نفسه الصادر عن شاحنة الإطفاء الساكنة. (b) مفعول دوبلر.



الشكل18.5. تمثل النقط الحمراء المنبع.

يحدث هذا الأمر لأن سيارة الإطفاء تطارد صدور الموجة التي سبق إصدارها، وتصدر الذرا المتتالية الواحدة أقرب إلى الأخرى. ومِنْ ثَمَّ فإن المراقب الذي يكون أمام السيارة سيكشف مزيداً من ذرا الأمواج المارة في الثانية، ومِنْ ثَمَّ يكون التواتر المسموع أعلى. أما صدور الموجة الصادرة خلف السيارة، من جهة أخرى، فهي أكثر تباعداً فيما بينها منها في حالة السكون لأن السيارة تبعد عنها. ومن ثم يمر بالمراقب خلف السيارة المتحركة عدد أقل من ذرا الأمواج، الشكل 18.4b.

يمكننا حساب انزياح التواتر الذي تدركه الأذن بالاعتماد على الشكل18.5، وافتراض أن الهواء (أو أي وسط آخر) في حالة سكون في إطارنا المرجعي. في الشكل18.5a نمثل منبع الصوت ببقعة حمراء، وهو في حالة سكون. تظهر ذروتان موجيتان متتاليتان البعد بينهما هو λ، الطول الموجي. فإذا كان تواتر المنبع f، فإن الزمن بين إصداري ذروتي الموجتين: $T=\frac{1}{f}=\frac{\lambda}{v_{snd}}$، حيث v_{snd}، سرعة الموجة الصوتية في الهواء. أما في الشكل18.5b، فإن المنبع يتحرك بسرعة v_{source} نحو المراقب. وخلال الزمن T، تكون ذروة الموجة الأولى قد قطعت مسافة $d=v_{snd}T=\lambda$، ويكون المنبع قد تحرك في الوقت نفسه مسافة $d_{source}=v_{source}T$. ومِنْ ثَمَّ فإن البعد بين ذروتين موجيتين متتاليتين الذي هو الطول الموجي λ' الذي سيدركه المراقب هو:

$$\lambda'=d-d_{source}=\lambda-v_{source}T=\lambda-v_{source}\frac{\lambda}{v_{snd}}=\lambda\left(1-\frac{v_{source}}{v_{snd}}\right)$$

نطرح λ، من طرفي هذه المعادلة لنجد أن الانزياح في الطول الموجي $\Delta\lambda$، يساوي

$$\Delta\lambda=\lambda'-\lambda=-\lambda\frac{v_{source}}{v_{snd}}$$

ومِنْ ثَمَّ فإن الانزياح في الطول الموجي يتناسب طردياً مع سرعة المنبع v_{source}. ومِنْ ثَمَّ يعطى التواتر f' الذي يدركه مراقب ساكن على الأرض بالمعادلة (15.15):

$$f'=\frac{v_{snd}}{\lambda'}=\frac{v_{snd}}{\lambda\left(1-\frac{v_{source}}{v_{snd}}\right)}$$

وإذا كان $v_{snd}/\lambda=f$ فإن

(18.1a) منبع يتحرك نحو مراقب ساكن $$f'=\frac{f}{\left(1-\frac{v_{source}}{v_{snd}}\right)}$$

ولأن المقام أقل من 1، يكون التواتر المسجل f'، أعلى من تواتر المنبع f، أي إن $f' > f$. فعندما يصدر، على سبيل المثال، منبع صوتاً تواتره $400\,Hz$ ثم يتحرك نحو مراقب ساكن بسرعة 30m/s، فإن المراقب سيسمع في الدرجة $20^{\circ}C$ تواتراً قدره:

$$f' = \frac{400\,Hz}{\left(1 - \dfrac{30\,m/s}{343\,m/s}\right)} = 438\,Hz$$

وفي حالة حالة منبع يبتعد عن مراقب ساكن، بسرعة v_{source}، بإجراء المحاكمات أعلاه نفسها، تتحول إشارة الناقص على d_{source} (في الأعلى) في الطول الموجي λ' الذي يدركه المراقب إلى إشارة موجبة.

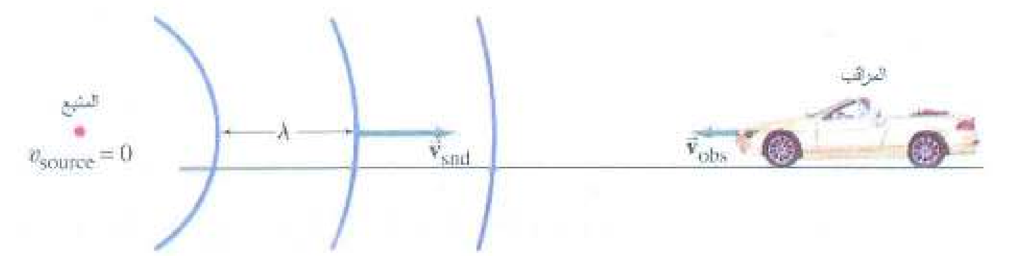
$$\lambda' = d + d_{source}$$
$$= \lambda\left(1 + \frac{v_{source}}{v_{snd}}\right)$$

ومِنْ ثَمَّ يكون الفارق بين الطولين الموجيين الصادر والملاحظ $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = +\lambda \dfrac{v_{source}}{v_{snd}}$. ويكون تواتر الموجة الملاحظ $f' = v_{snd} / \lambda'$

(18.1b) في حالة المنبع يبتعد عن المراقب $$f' = \frac{f}{\left(1 + \dfrac{v_{source}}{v_{snd}}\right)}$$

فإذا كان منبع يصدر التواتر $400\,Hz$ ويبتعد عن المراقب بسرعة 30m/s، فإن المراقب يسمع التواتر

$$f' = \frac{400}{\left(1 + \dfrac{30\,m/s}{343\,m/s}\right)} = 368\,Hz$$



الشكل18.6. مراقب يتحرك بسرعة v_{obs} نحو منبع ساكن يكشف ذرا موجية تمر بسرعة $v' = v_{snd} + v_{obs}$ إذْ v_{snd} سرعة الأمواج الصوتية في الهواء.

يحدث مفعول دوبلر أيضاً عندما يكون المنبع ساكناً والمراقب متحركاً. فإذا كان المراقب يتحرك نحو المنبع، تكون الحدة المسموعة أعلى من تواتر المنبع الصادر. وإذا كان المراقب يبتعد عن المنبع فإن الحدّة المسموعة تكون أخفض. ففي حالة منبع ثابت ومراقب متحرك، البعد بين ذروتين موجيتين، أي

الطول الموجي λ ، لا يتغير. ولكن سرعة اقتراب الذروتين تتغير بالنسبة للمراقب. فإذا كان المراقب يتحرك نحو المنبع (الشكل18.6)، فإن سرعة الأمواج v' بالنسبة للمراقب هي مجرد حاصل جمع السرعتين: $v' = v_{snd} + v_{obs}$، حيث v_{snd} سرعة الصوت في الهواء (يفترض أن الهواء ساكن)، و v_{obs} سرعة المراقب. ومن ثم فإن التواتر المسموع

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v_{snd} + v_{obs}}{\lambda}$$

ولما كان $\lambda = v_{snd} / f$ ، كان

$$f' = \frac{(v_{snd} + v_{obs}) f}{v_{snd}}$$

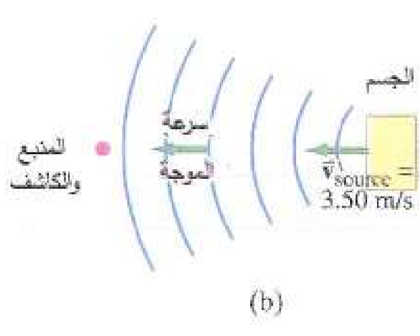
أو

$$f' = \left(1 + \frac{v_{obs}}{v_{snd}}\right) f \quad \text{المراقب يتحرك نحو المنبع الساكن} \quad (18.2a)$$

إذا كان المراقب يتحرك من المنبع، فإن سرعته النسبية تكون $v' = v_{snd} - v_{obs}$ ومن ثم

$$f' = \left(1 - \frac{v_{obs}}{v_{snd}}\right) f \quad \text{المراقب يبتعد عن منبع ساكن} \quad (18.2b)$$

مثال18.1. انزياحا دوبلر Two Doppler shifts. موجة صوتية تواترها 5000Hz تصدر عن منبع ثابت. تنعكس هذه الموجة الصوتية عن منبع متحرك بسرعة 3.50m/s نحو المنبع (الشكل18.7a). ما تواتر الموجة المنعكسة عن الجسم المتحرك لدى الكشف عنها بكاشف في حالة السكون بالقرب من المنبع.



الشكل18.7

الطريقة. يوجد عملياً انزياحا دوبلر في هذه الحالة. أولاً إن الجسم المتحرك يؤدي دور مراقب يتحرك بسرعة $v_{obs} = 3.50 m/s$ نحو المنبع (الشكل18.7a) ومِنْ ثَمّ يكشف موجة صوتية تواترها $f' = f[1 + (v_{obs} / v_{snd})]$. ثانياً: إن انعكاس الموجة عن الجسم المتحرك يكافئ الجسم وهو يعيد إصدار الموجة، ويسلك عملياً سلوك منبع متحرك، بسرعة $v_{source} = 3.50 m/s$ (الشكل18.7b). فيكون التواتر النهائي $f'' = f'/[1 - (v_{source} / v_{snd})]$ الذي يكشف عنه، (المعادلة 18.2a).

الحل. التواتر f' الذي يكشف عنه الجسم المتحرك:

$$f' = f[1+(v_{obs}/v_{snd})] = \left(1+\frac{3.50m/s}{343m/s}\right)(5000\,Hz) = 5051\,\text{Hz}$$

يصدر الجسم المتحرك في هذه الحالة (يعكس) صوتاً تواتره (المعادلة 18.2a)

$$f'' = \frac{f'}{[1-(v_{source}/v_{snd})]} = \frac{5051}{1-\dfrac{3.50m/s}{343m/s}} = 5103\,\text{Hz}$$

ومِنْ ثَمَّ يساوي انزياحا التواتر 103Hz.

مقياس دوبلر لتدفق الدم

عندما تنضم الموجة المنعكسة إلى الموجة الواردة في المثال 18.1 (وليكن إلكترونياً)، تتداخل إحداهما مع الأخرى وتتولد خفقات beats، بتواتر يساوي الفارق بين تواتري الموجة الواردة والمنعكسة، في مثالنا 103Hz.

تستخدم تقنية دوبلر في العديد من التطبيقات الطبية، ولاسيّما في الأمواج فوق الصوتية في مجال تواتر الميغاهرتز. إذ يمكن استخدام الأمواج فوق الصوتية المنعكسة عن خلايا الدم الحمراء مثلاً في تحديد سرعة تدفق الدم. وبالمثل يمكن استخدام هذه التقنية في الكشف عن حركة صدر جنين صغير وفي مراقبة حركاته القلبية.

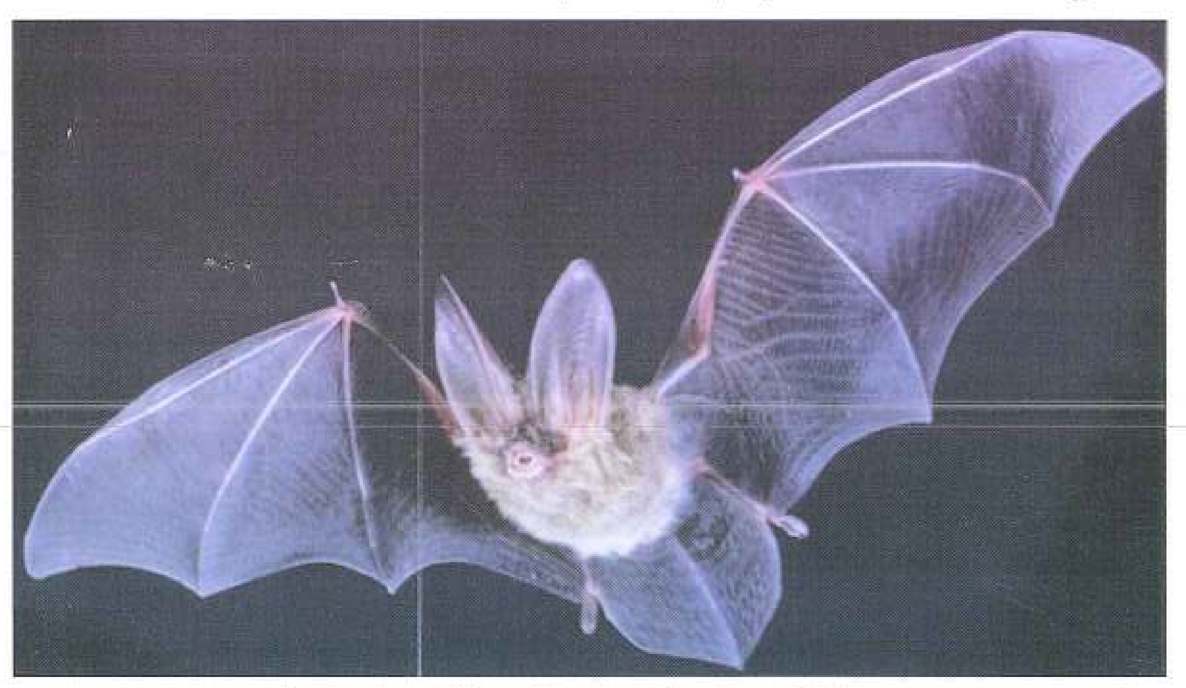
من عجائب الخلق أن الخفافيش والفراش تمارس تطبيق مفعول دوبلر من دون معرفة أسسها في الفيزياء. حيث تطير الخفافيش لتبحث عن فريستها بإصدار أمواج فوق صوتية، ومن ثم الكشف عن أصداء هذه الأمواج. تتميز هذه الأمواج بتواتراتها العالية (بالنسبة للأمواج المسموعة) التي تقدَّر بنحو $83\,kHz$ وهي أعلى بكثير من عتبة السمع لدى الإنسان.

بعد أن يصدر الصوت من منخري الخفاش يمكن أن ينعكس عن فراشة ما ويعود إلى أذنيه. تؤدي الحركتان النسبيتان لكل من الخفاش والفراشة بالنسبة إلى الهواء إلى اختلاف التواتر الذي يسمعه الخفاش ببضعة كيلو هرتز عن التواتر الذي أصدره. وتعدل المعادلة التي تعطي فارق التواتر في هذه الحالة لتعطي الانزياح بدلالة سرعة كل منهما v_{obs} وv_{source} مع الانتباه إلى إشارة كل منهما الجبرية لتقابل الابتعاد أم الاقتراب لتصبح:

$$f' = \left(\frac{v \pm v_{obs}}{v \mp v_{source}}\right) f_0$$

يقوم الخفاش آلياً بترجمة هذا الفارق إلى سرعة نسبية بينه وبين الفراشة ومِنْ ثَمَّ يستطيع أن ينقضَّ عليها. ويفيد وجود كاشفين(أذنا الخفاش) بتعيين الموقع أيضاً.

يتجنب بعض الفراش الوقوع في الأسر بالابتعاد عن اتجاه الصوت الذي يسمعه. إذْ يؤدي هذا الاختيار لمسار الطيران إلى تخفيض فارق التواتر بين الصوت الذي يصدره الخفاش والصوت الذي يسمعه ومِنْ ثَمَّ لا يحس الخفاش بالصدى. كما أن بعض الفراش يتجنب الوقوع في الأسر من خلال إحداث قرقعة بهدف توليد أمواج فوق صوتية خاصة به ومِنْ ثَمَّ يشوش نظام الكشف لدى الخفاش ويضلله.



الخفاش يستخدم الأمواج فوق الصوتية للإبحار في العتمة.

يستخدم الخفاش تشكيلة من تقنيات تحديد مواقع الأصداء للكشف عن فرائسه. فهو يستطيع الكشف عن تواترات تزيد على 100 kHz، وربما تصل إلى 200 kHz.

تطورت التقنية التي تستفيد من مفعول دوبلر مع استعمال مجسات ذات قطاعات متعددة معروفة التوزيع والتباعد، فأصبحت تعطي صوراً في الزمن الحقيقي لحركات القلب، وليس فقط لجريان الدم، وذلك اعتماداً على فروق الطور والانزياحات المقابلة لقطاعات المجس المختلفة.

الفصل التاسع عشر

مفتت الحصى والطلقة الصوتية

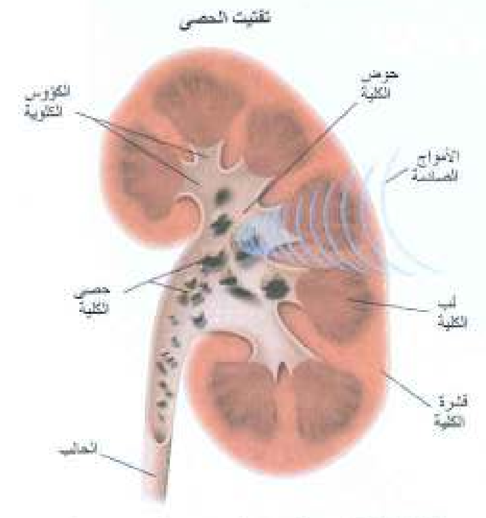
Lithotripter & Sound bullet

19.1. تمهيد

يسمح مفتت الحصى Lithotripter بمعالجة حصيات الجهاز البولي والقناة الصفراوية، وقد جرت عليه أبحاث تهدف إلى دراسة تأثير الأمواج الصادمة في الخلايا السرطانية، دلت على سمّية الأمواج الصادمة بالنسبة للخلايا الورمية ومِنْ ثَمَّ فعاليتها. يتم اللجوء إلى مفتت الحصى فور ظهور أعراض انسداد وما شابه ذلك أو التهاب. فالحصى الكبيرة التي تؤدي إلى الانسداد يمكن أن تؤدي إلى استسقاء الكلية hydronephrosis والإضرار بها، فضلاً عن تزايد احتمال التهابها.

وتفتيت الحصى Lithotripsy إجراء طبي يستخدم الأمواج الصادمة لتحطيم الحصى في الكلية أو المثانة أو الحالب. بعد العملية، تطرح فتات الحصى من الجسم عن طريق البول.

إن تفتيت الحصى بالأمواج الصادمة بدءاً من خارج الجسم Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL) هو النوع الأكثر شيوعاً لتفتيت الحصى الشكل19.1، فهي طريقة المعالجة الأقل هجومية .



الشكل19.1. تفتيت الحصى في الكلية.

19.2. العناصر التي يتكون منها مفتت للحصى

يتكون مفتت الحصى (الشكل19.2) من العناصر التالية:

- منبع للأمواج الصادمة أو الأمواج فوق الصوتية.
- نظام يسمح بتقريب الأمواج بحيث تقع النقطة البؤرية على الحصى.
- وسط يسمح بنقل الأمواج إلى داخل جسم المريض.
- نظام لتحديد موقع الحصى.

استعمل الماء وسط انتشار الأمواج الصادمة في الجيل الأول لمفتت الحصى حيث يُغطّس المريض في حوض كبير. أما في أجهزة الجيل الثاني فأصبح يتم التلامس بين منبع الأمواج والمريض باستخدام كيس غشائي ممتلئ بالماء أو عن طريق حوض صغير يغمر فيه المريض أسفل ظهره عند الناحية القطَنيَّة.

يمكن تبئير هذه الأمواج بعاكس نصف إهليليجي semi-ellipsoidal (يخضع لنظام تعيين موقع الحصاة) في مساحات صغيرة جداً من العضوية كافية لتحطيم الحصى دون أن تتأثر باقي العضوية بها. وتصرف حالياً جهود بحثية لتحسين أداء أدوات التبئير التي تسمى أحياناً عدسات فوق صوتية لتحسين مردودها أولاً وعدم إيذاء النسج المحيطة بهندسة مناسبة للحصول على ظاهرة التكهف قرب الحصاة.

ويستخدم في تعيين موقع الحصاة إما أجهزة التصوير الشعاعي أو تنظير الفلورة fluoroscopy (بالأشعة السينية) وإمّا أجهزة تنظير بالأمواج فوق الصوتية.



الشكل19.2. مفتت الحصى يظهر عليه نظام تحديد موقع الحصى بالأشعة السينية ورأس مولد الأمواج الصادمة، ونظام تقريب الأمواج الصادمة وطاولة المريض.

يرتدي المريض، قبل إجراء المعالجة، عباءة طبية، ويستلقي على طاولة الفحص على وسادة لينة ممتلئة بالماء، ويعطى مهدئاً ومخففاً للألم، كما يعطى مضاداً حيوياً قبل العملية تفادياً للالتهاب.

لدى الاستلقاء على الوسادة المائية، تمرر سلسلة سريعة من الأمواج الصادمة العالية الطاقة في الماء نحو الحصى. من دون أن يصاب الجسم بأذى، فتتفتت الحصى إلى رمل ناعم جداً. يمكن لهذه الجسيمات أن تطرح بسهولة من خلال المجرى البولي.



الشكل 19.2b. مفتت الحصى بالأمواج الصادمة.

19.3. آلية توليد الأمواج الصادمة

تتولد الأمواج الصادمة عندما يتحرك جسم في وسط ما بسرعة تفوق سرعة الصوت في ذلك الوسط. تظهر هذه الأمواج على شكل نبضة قصيرة من رتبة النانو ثانية. وهي تتخامد بسرعة عندما تنتشر في الماء أو في نسج الجسم.

تتولد الأمواج الصادمة أيضاً إما بالانفراغ الكهربائي وإما باستخدام ليزر استطاعته عالية في حين تتولد الأمواج فوق الصوتية باستخدام بلورات كهرضغطية. يوجد ثلاثة أنواع لمولدات الأمواج الصادمة: كهرهدروليكية electrohydraulic وكهرطيسية وكهرضغطية.

19.4. طرائق تفتيت الحصى

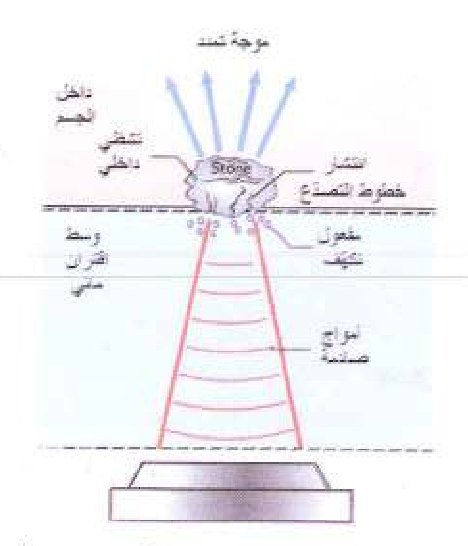
تفتيت الحصى هي طريقة لتفتيت حصى الكلية داخلها، من دون أي تداخل جراحي. في أثناء تفتيت الحصى، تمر الأمواج الصادمة أو الأمواج فوق الصوتية الموجهة بعناية داخل الجسم من دون أن تضر به وتصدم الحصى، مؤدية إلى تحطيمها إلى جسيمات أشبه بالرمل. علماً أنه يمكن رؤية الحصى بوضوح بمراقب الأشعة السينية لاستهدافها بدقة بالأمواج الصادمة. فإذا كان ثمة شذوذات تشريحية تمنع

ذلك، يلجأ إلى طرائق أخرى لإزالة الحصى. من خلال الفحص واختبارات الأشعة السينية وغيرها من الأدوات المساعدة يمكن أن يقرر الطبيب إذا كانت هذه الطريقة هي أفضل طريقة لمعالجة المصاب. في بعض الحالات، يمكن الجمع بين تفتيت الحصى وأشكال أخرى للمعالجة.

1) تفتيت الحصى من خارج الجسم بالأمواج الصادمة shock waves التي يمكن توليدها بالانفراغ الكهربائي أو بالليزر
2) تفتيت الحصى بإحداث فتحة في الظهر وإجراء نفق إلى الكلية ثم التفتيت مباشرة.
3) تفتيت الحصى بإدخال أنبوب عن طريق المجرى البولي إلى المثانة أو الحالب ثم التفتيت مباشرة.

19.5. آليات تفتيت الحصى ومعالجتها

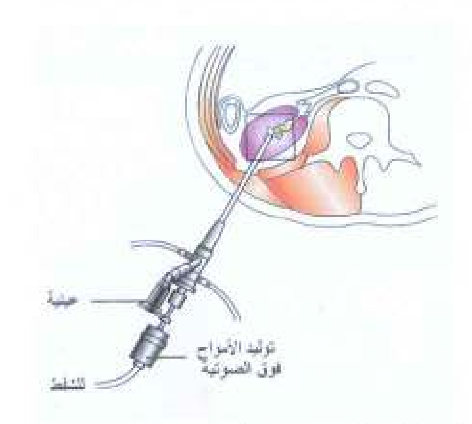
تعتمد آلية التفتيت على التصادم بين الموجة وجدران الحصاة، وبصورة خاصة على الأمواج النافذة، فتنقل الطاقة التي تحملها الموجة إلى الحصاة منتشرة فيها لتتآثر ضمن الحصاة باحثة عن نقاط ضعف فيها مثل وجود فراغات أو انخلاعات فتشطرها وتفجرها (الشكل19.3) نتيجة للطاقة المتحررة، وتتفتت إلى أجزاء صغيرة (تطرح عن طريق البول) تراوح أبعادها بين2 إلى3 ملمتر، ويتكرر تطبيق هذه الأمواج عند الحاجة.



الشكل19.3. تحطيم الحصى بالأمواج الصادمة من خارج الجسم.

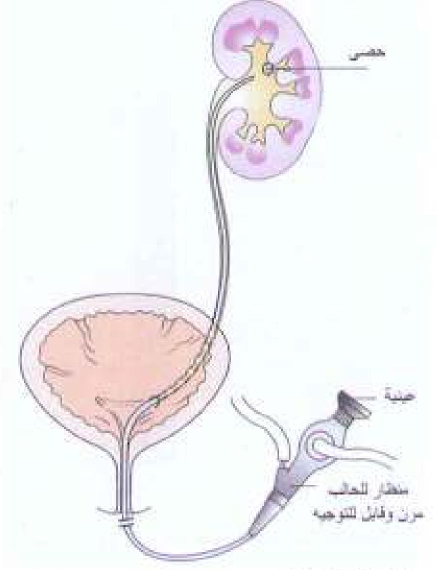
تستخدم هذه التقانة الأمواج الصادمة الموجهة أو سعات الضغط العالية الطاقة التي تتولد في الهواء أو الماء بالتحرير المفاجئ للطاقة، مع الأخذ في الحسبان اختلاف الممانعة. يستدعي الأمر أحياناً وجود مادة مناسبة لتحسين المردود. تتولد الأمواج الصادمة خارج الجسم بمفتت للحصى ثم يتم توجيهها لتحطيم الحصى في المجرى البولي. يحدث التحطيم بالإجهاد التمددي tensile stress الذي يزيل مادة السطح، ويشظّي الحصى أو يسحقها بتطبيق العديد من الأمواج الصادمة، وفي نهاية المطاف قوى التكهف (الشكل19.3). يعتمد عدد الأمواج الصادمة اللازمة لتحطيم الحصى بشكل كاف على تركيب الحصى والضغط البؤري وكثافة الطاقة والسطح الفاصل مع المائع. فالحصى التي تتحطم بسهولة تتكون من ثنائي هدرات حماضات الكالسيوم calcium oxalate dihydrate وحمض البول والسترافيت struvite وهو سداسي هدرات فوسفات الأمونيوم والمغنزيوم $NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$. بينما تتكون الحصى التي يصعب تفتيتها من أحادي هدرات حماضات الكالسيوم والسيستين وفوسفات الكالسيوم. يعتمد استخدام تفتيت الحصى بالأمواج الصادمة shock wave lithotripsy SWL على أبعاد الحصى وموقعها والسمات

التشريحية للحصى؛ إذ يكون SWL أقل فعالية في حالة الحصى الكبيرة والأفراد المصابين بالسمنة لصعوبة جعل الحصى في النقطة البؤرية. ومجرد تمت معالجة الحصى بشكل كاف يمكن أن يمر الحطام بسهولة عن طريق المجاري البولية.



الشكل19.4. تفتيت الحصى بتوليد الأمواج فوق الصوتية في داخل الكلية

عندما تفشل عملية تفتيت الحصى بالأمواج الصادمة من خارج الجسم لسبب ما، يتم اللجوء إلى استخراج الحصى من خلال فتحة في الظهر ونسيج الكلية percutaneous nephrolithotomy (الشكل19.4). وفي الحالة التي تكون فيها أبعاد الحصى في الحالب الأخفض صغيرة (قطرها أصغر من 7mm) تستخرج بملقط في منظار يمرر بالحالب (الشكل19.5).



الشكل19.5. استخراج الحصى بملقط.

19.6. الطلقات الصوتية والمشرط الجراحي

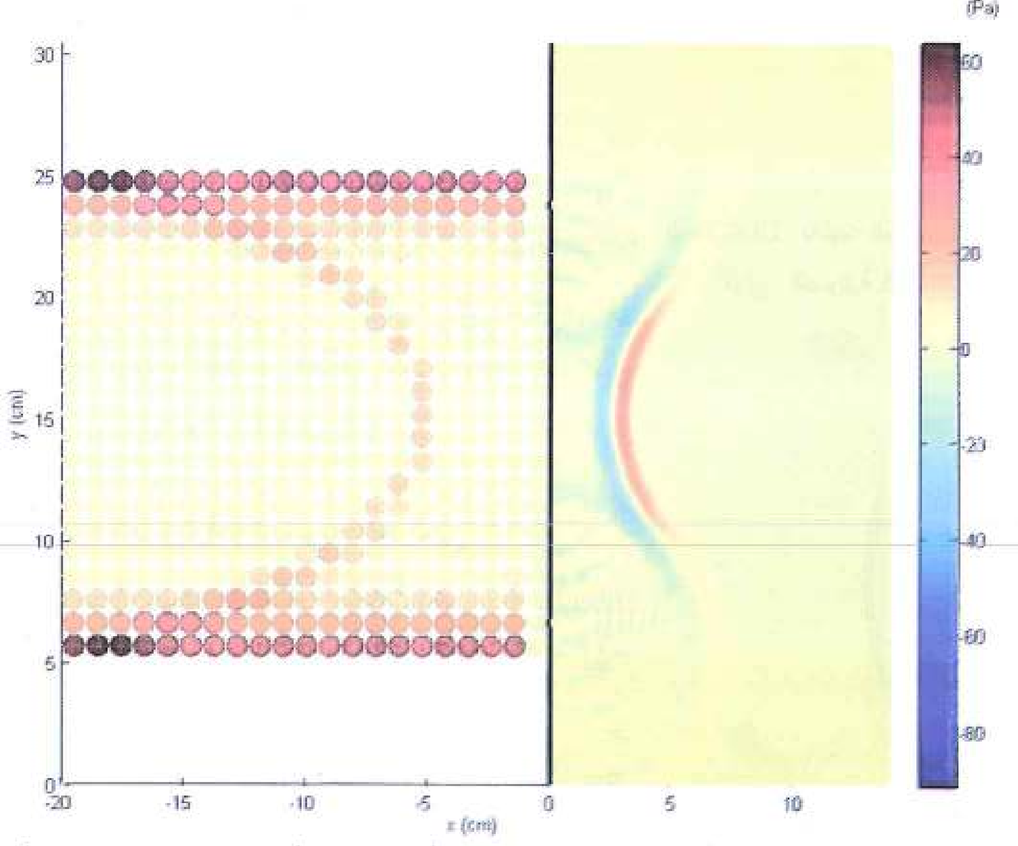
اقترح باحثون مؤخراً نموذجاً يصدر طلقات صوتية sound bullets، وهي نبضات صوتية مركزة جداً يمكن أن تستخدم كمشارط صوتية sonic scalpels، بوحي من مهد نيوتن (الشكل19.6) الذي يتكون من سلسلة من الكرات المتماثلة تنقل إلى الكرة الأخيرة صدم الكرة الأولى من السلسلة. ويعتمد هذا النقل وأمانته على نوع التصادم بين الكرات ومِنْ ثَمَّ يعتمد انتشار هذا الاضطراب والمعادلة التي تحكمه على العلاقة بين الإجهاد والانفعال، وإذا ما كان التصادم مرناً خطياً أم لدناً غير خطي. قام باحثو كاليفورنيا بمحاكاة وبناء نموذج سموه عدسة صوتية لاخطية، فوجدوا أنه يمكن توليد إشارات صوتية عالية السعة ومقربة في حيز صغير للغاية، دعيت طلقات صوتية. وقد سميت كذلك لأن انتشارها يشبه ما تحدثه طلقة أو رصاصة أطلقت من مسدس.



الشكل19.6. أرجوحة نيوتن.

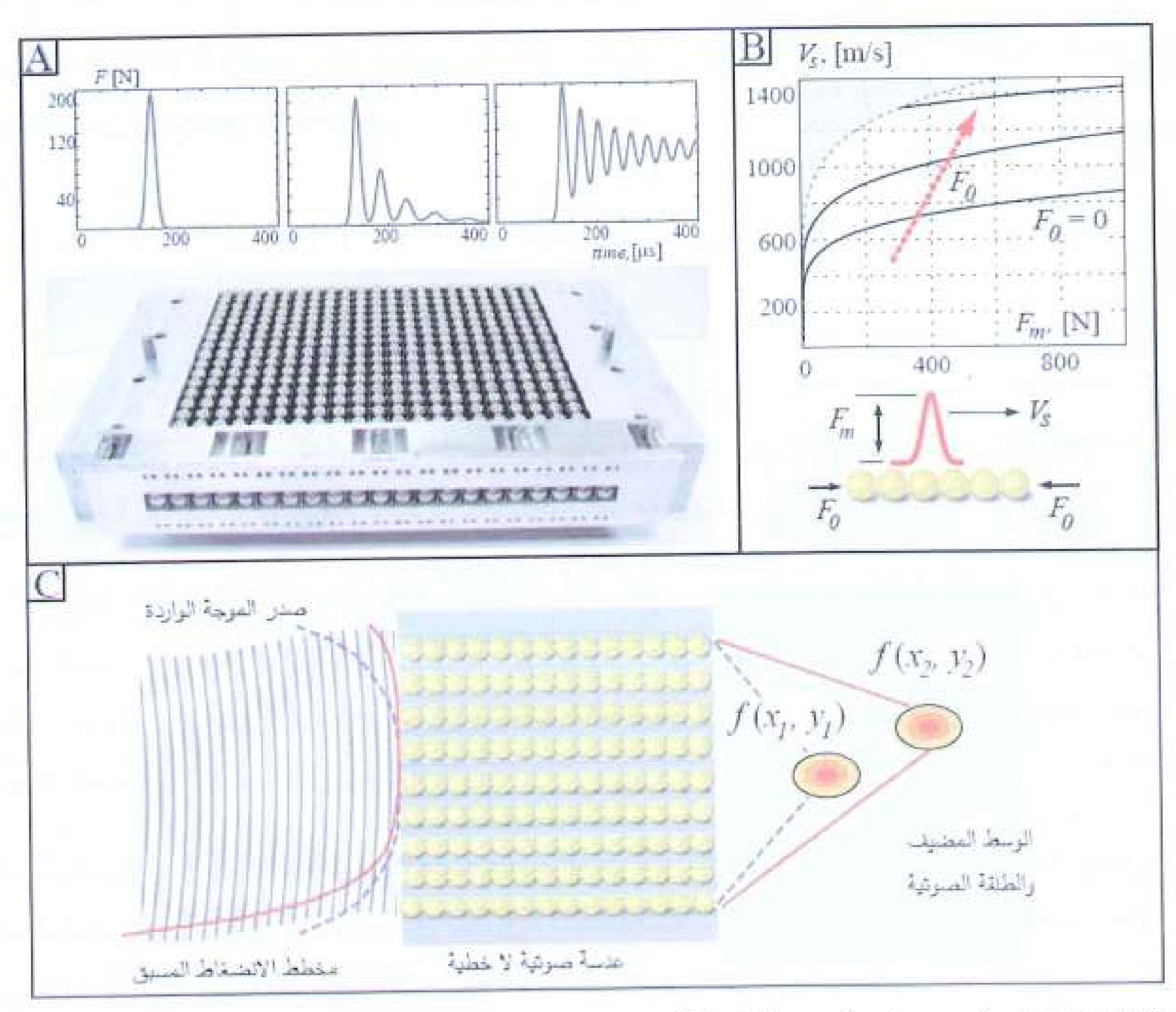
يمكن لهذه العدسة الصوتية وطلقاتها أن تحدث ثورة في مجالات عدة منها التصوير الطبي والمعالجة.

يحتوي نموذج هذه العدسة الصوتية على إحدى وعشرين سلسلة متوازية من الكرات المصنوعة من الفولاذ الذي لا يصدأ على شكل صفيف (الشكلان19.7 و19.8). تحوي كل سلسلة من السلاسل الإحدى والعشرين، إحدى وعشرين كرة قطر كل منها 9.5mm. وبالطبع يمكن استخدام جسيمات من مواد مرنة أخرى أو بأشكال مختلفة أو كليهما.



الشكل19.7. العدسة الصوتية مكونة من إحدى وعشرين سلسلة، كل سلسلة تضم إحدى وعشرين كريّة من الفولاذ الذي لا يصدأ. تُظْهِرُ الألوان شدة الموجة وتوزعها مكانياً.

يعتمد عمل العدسة على التحضير الأولي لنوع التصادم بين الكرات، وذلك بتطبيق قوة راصة أولية على كل سلسلة من السلاسل تؤخذ قيمتها وفق المجال الذي يتحقق فيه التصادم اللاخطي. ثم تثار نبضة في العدسة في أحد طرفيها بضربة مطرقة، فتتولد الأمواج اللاخطية في كل سلسلة من السلاسل. وتعد هذه السلاسل أبسط تمثيل لأدلة موجية صوتية عالية اللاخطية تستثمر خصائص تماس الجسيمات لتوليف أشكال الإشارات الصوتية المنتشرة وسرعة انتشارها، مولدة نبضات صوتية متراصة تعرف بالأمواج السوليتونية الوحيدة Solitary waves. تعدّ هذه الأمواج أحد حلول معادلة الانتشار اللاخطية، وتتصف بأنها تنتشر دون تخامد يذكر محافظة على شكل الموجة أو النبضة. وتتصف بسعة عالية جداً من دون أن تخضع لأي تشوه في العدسة خلافاً للإشارات المتولدة بالتقانة المتوافرة حالياً.



الشكل19.8. نموذج بدني لعدسة صوتية لاخطية A تتضمن إحدى وعشرين سلسلة من الكريات، تتكون كل سلسلة من إحدى وعشرين كرية من الفولاذ (كثافتها $8100kg/m^3$، وعامل يانغ لها E=196GPa، وقطر كل منها 9.5mm) وتستخدم كأداة لتكييف الموجة، موضوعة في صندوق من الألمنيوم. تصف الرسوم المدرجة في أعلى الشكل إلى اليسار موجة وحيدة مفردة، وفي الوسط قطار من الأمواج الوحيدة، وإلى اليمين موجة صادمة تنتشر في سلسلة من الكريات الفولاذية تم الحصول عليها بالمحاكاة العددية. تعتمد سرعة الطور Vs بشدة على حالة الانفعال الابتدائية التي يحددها الانضغاط السكوني F_0 (B) (تدل المنطقة المظللة على استجابة لا خطية ضعيفة). تمكن هذه الخصائص من تصميم أدوات قادرة على تبئير الأمواج أو تبعيدها أو إعادة توجيهها، (C) يمكن استخدام توزع قطعي لـ F_0 لتبئير الطاقة الصوتية في طلقة صوتية. تقع البؤرة على محور تناظر العدسة $f(x_1,y_1)$ عندما تكون F_0 موزعة بشكل متناظر وفقاً للخط المنقط الأزرق، أو لا تقع على محور التناظر $f(x_2,y_2)$ عندما يكون التوزع غير متناظر كما في حالة الخط المستمر الأحمر.

وبتغيير مقدار الانضغاط لكل سلسلة، تمكن الباحثون من تغيير سرعة الموجة الوحيدة عندما تخرج من الصفيف، ومِنْ ثَمَّ يمكن تجميعها لتلتئم في موضع خاص هو النقطة البؤرية (الشكلان19.7 و 19.8). من شأن هذا الالتئام للأمواج الوحيدة في النقطة البؤرية أن يشكل الطلقة الصوتية، وهي موجة صوتية

عالية السعة شديدة التراص. يمكن لتغيير برامترات الجملة أن يولّد أيضاً وابلاً من الطلقات الصوتية السريعة، التي تتتابع نحو النقطة نفسها.
تجمع الكرات في التصميم الحالي وفق ترتيب ثنائي البعد، كل صف فيه مستقل عن الصفوف المجاورة. يتنبأ الباحثون أنه من السهل بناء عدسة ثلاثية البعد تسمح بالتحكم في شكلها ومسار انتقالها في ثلاثة أبعاد.

تطلق هذه العدسة إمكانية توليد إشارات عالية السعة متراصة، في وسط خطي، كما تسمح بالتحكم الديناميكي بموضع النقطة البؤرية. مما يعني أنه ليس ضرورياً تغيير أي مركبة هندسية من العدسة لتغيير موضع النقطة البؤرية. وكل ما يتم القيام به هو ضبط انضغاطية كل سلسلة من الكرات.

من شأن هذا الضبط فقط أن يسهل تكييف الطلقات الصوتية مع عدد كبير من التطبيقات. إذ إن أي فرد خضع لفحص بالأمواج فوق الصوتية لاحظ أن العامل على الجهاز يبدل المجسات تبعاً لخصائص وموقع ما يجري تصويره في الجسم. وهذه العدسة الصوتية لا تتطلب استبدال مكوناتها، وإنما مجرد ضبط الانضغاطية المطبقة على كل سلسلة.

كانت تهدف العدسة الصوتية التي ابتكرها داريو وسبادوني لأن تكون برهاناً على المبدأ. وهي تحتاج، في الاستخدامات العملية، إلى تصميم محسن لتطبيق الانضغاطات السكونية على كل سلسلة، بالاعتماد مثلاً على الإلكترونيات عوضاً عن الصدمات الميكانيكية التي تجري حالياً في المختبر.

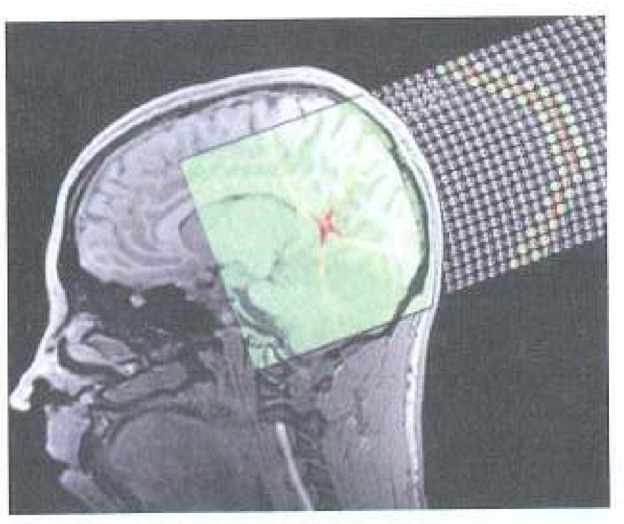
ما تزال هذه العدسة تحتاج إلى تجاوز وضوح وأمان التصوير الطبي التقليدي بالأمواج فوق الصوتية. إذ إن النبضات التي تولدها العدسة الصوتية والتي تقريبها أكبر بمرتبة منه في الأجهزة الصوتية التقليدية وسعاتها أكبر بمراتب منها، تخفض الآثار الضارة للضجيج، فتولد صورة أوضح للهدف. كما يمكنها أن تنتقل مسافة أعمق في الجسم من النبضات المنخفضة السعة.

مما يثير الفضول أن هذه العدسة تجعل ابتكار مشرط غير هجومي ممكناً يمكن تركيزه على النسج السرطانية المتوضعة في عمق الجسم وإتلافها.

تسعى طرائق العلاج الطبية الحديثة كالمعالجة بالحرارة المفرطة hyperthermia therapy (الفصل17) إلى العمل على النسج البشرية برفع درجة حرارتها موضعياً. وهذا ما يجري غالباً بتركيز إشارات صوتية عالية الطاقة على مساحة صغيرة، تتطلب التحكم الدقيق بمنطقة التبئير، بحيث يتم تجنب تسخين النسيج السليم. وهذا ما تحدثه العدسة في منطقة بؤرية شديدة التراص، فيمكن أن تساعد في ابتكار تقنيات الفرط حرارية.

أضف إلى ذلك أن الطلقات الصوتية يمكن أن توحي بطريقة لا تحطيمية في جس الأجسام غير الشفافة وتحليل داخلها كالجسور وأغلفة السفن وأجنحة الطائرات والبحث عن الصدوع والعيوب الأخرى.

ينخفض حالياً مردود العدسات الصوتية بمجال عملها الخطي، الذي يحد من دقة التقريب والسعة التي يمكن بلوغها في النقطة البؤرية. وأما العدسات الصوتية التي اقترحها الباحثون فهي ترفع المفعولات اللاخطية لتوليد النبضات الصوتية المتراصة بطاقات أعلى بكثير مما يمكن الوصول إليه حالياً، بالإضافة إلى فائدة توفير تحكم كبير بالموقع البؤري.



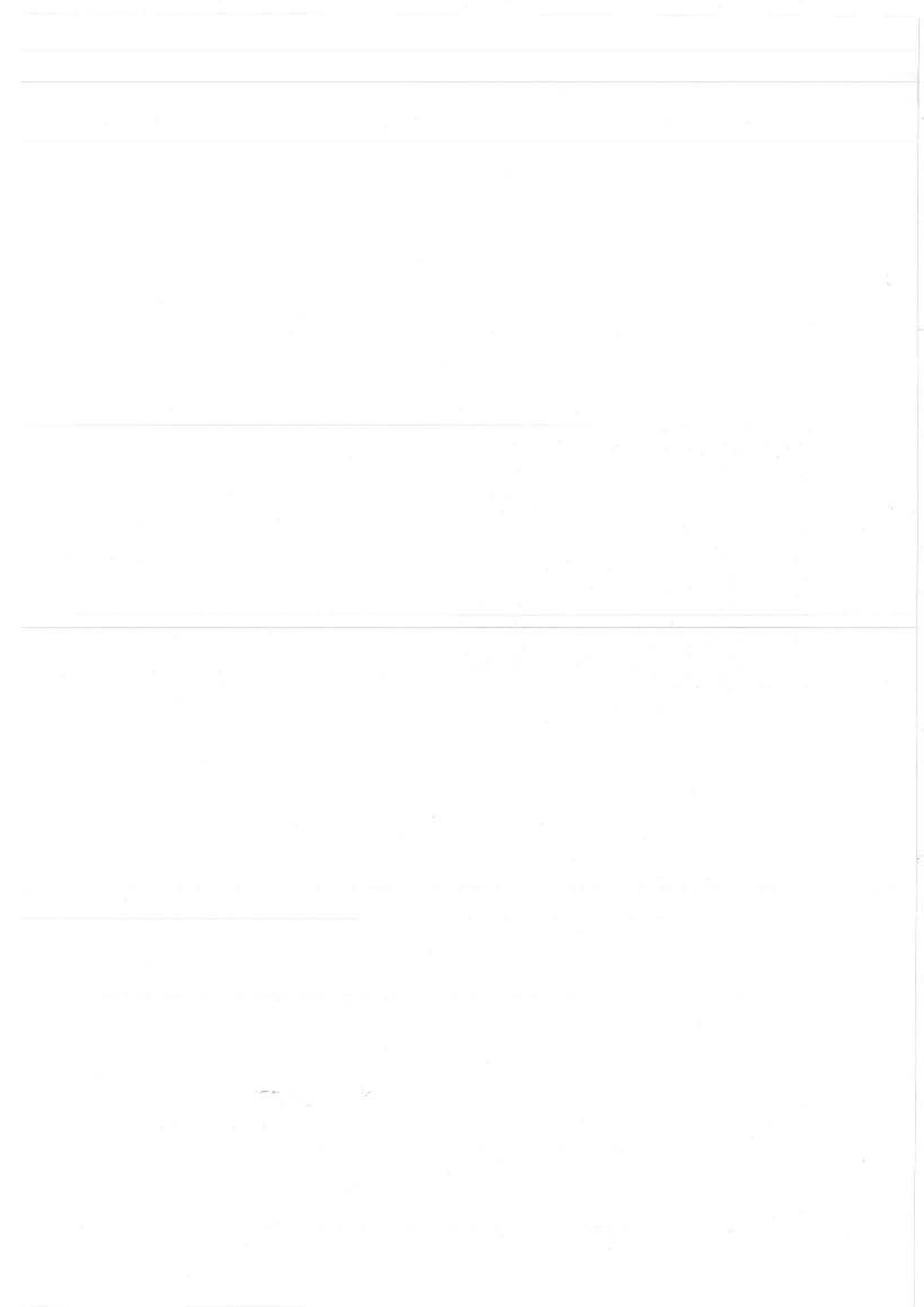
الشكل19.9. تطبيق الطلقة الصوتية على ورم في الدماغ.

يبتكر الباحثون طلقات صوتية، وهي نبضات صوتية عالية التقريب إمكانية استخدام عدسة صوتية لاخطية في توليد طلقة صوتية للمعالجة بفرط الحرارة. تمثل الكرات الملونة أمواجاً صوتية لاخطية تنتشر في سلاسل الكرات. يتحرض انحناء صدر الموجة بالضغط المسبق لكل صف من صفوف الكرات، ويستخدم في توليد تأخيرات زمنية مناسبة وذلك لتجميع الطاقة الصوتية في نقطة بؤرية معينة. تمثل الصورة في الشكل19.9 انضمام طلقة صوتية على صورة تجاوب مغنطيسي *MR* حصل عليها في مركز تصوير الدماغ في معهد *Caltech*.

إذا تم تكييف هذه النبضات بشكل مختلف فيمكن استخدامها في الحصول على صور جودتها قريبة من جودة الصور بالأشعة السينية لداخل الجسم، ولكن من دون خطر التعرض للأشعة السينية.

يسهل التحكم بالأمواج الوحيدة في حالة الصوت، ويمكنها بلوغ شدات بؤرية مرتفعة في الموجة الصوتية الصادرة، ويمكن التحكم بموقعها من دون الحاجة لتغيير بنية العدسة. كما يمكن إذا تم عصر السلاسل الداخلية معاً أكثر أن تنتقل الأمواج الوحيدة في السلاسل الخارجية، مما يؤدي إلى نبضات صوتية متتالية.

لا تزال الجملة قيد التطوير ولم يجر اختبارها بعد على الخلايا الحية. ربما تمر بضع سنوات قبل أن تتوافر للتطبيقات الطبية أو غيرها.



الفصل العشرون

تصوير المرونة بالأمواج فوق الصوتية: المبادئ والتقنيات

Ultrasound elastography: Principles and techniques

كان الأطباء المصريون القدماء، كأطباء اليوم يمارسون جس الأعضاء للكشف عن الشذوذات (انظر الشكل20.1). يتطلب التشخيص بالجس المهارة والخبرة، وهو أداة تشخيصية مفيدة: فالكتلة التي يصعب تشوهها في عضو معين غالباً ما ترتبط بوجود ورم. حتى إن الجراحين يستخدمون الجس ليستدلوا بفعالية على المناطق التي يريدون جراحتها.



الشكل20.1. يمكن للطبيب أن يكشف بجس نسيج رخو بيديه عن وجود عقد قاسية فيه. تتطلب هذه الطريقة التشخيصية الخبرة والمهارة، ولو أنها لا تخلو من الخطأ. غير أنه تظهر حالياً تقنيات تصوير لمرونة النسج يمكن أن تستغني عن الجس اليدوي.

وعندما انتشر تصوير الصدى الصوتي في أوساط المشافي، في نهاية السبعينات، كانوا على ثقة بأن الصور فوق الصوتية ستعطي معلومات دقيقة عن مرونة النسج وستكون مفيدة في الكشف عن الأورام. ولا يسعنا إلاّ الاعتراف بأن تصوير الصدى فوق الصوتي شهد أكبر نجاح في القلبية والتوليد (الفصل17).

يتضمن تصوير المرونة عدة تقنيات تختلف فيما بينها باختلاف ما يستعمل في أمور رئيسية:

أولاً: طريقة تحريض الأثر الميكانيكي من حيث كونه داخلياً (تتابع التنفس أو تتبع ضربات القلب)، أومن حيث كونه محرِّضاً خارجياً (مجس فوق صوتي). وما إذا كان سكونياً (الجس) أو شبه سكوني (تواترات منخفضة 5-50Hz) أو دينميكياً (ميغا هرتز).

ثانياً: قياس استجابة النسيج التي قد تكون انفعالاً (تغيراً نسبياً في الأبعاد) يمكن قياسه ضوئياً أو ميكانيكياً أو بالرنين المغنطيسي. وقد تكون إجهاداً محلياً تقاس بمجس مناسب.

يبدو مفارقاً أن الأمواج فوق الصوتية لا تحمل معلومات عن مرونة النسج، على الرغم من اعتماد سرعتها على انضغاطية النسج (العلاقة 15.18) (أي على انضغاط النسج وتمددها بمرور الأمواج الضغطية فيها. ولفهم هذه الحقيقة نسترجع مبدأ تصوير الصدى فوق الصوتي (الفصل 17). تتضمن هذه التقنية شبكة تراجيم كهرضغطية تؤدي دوري الإرسال والاستقبال للأمواج فوق الصوتية في آن معاً. ففي طور

الإصدار، تصدر أول نبضة فوق صوتية قصيرة نحو النسج، وفي لحظة أخرى تستقبل الأصداء المرتدة عن مختلف البنى النسيجية وتسجلها. يتم تكرار هذه العملية مع إزاحة اتجاه النبضة فوق الصوتية، بحيث يتم مسح كامل الجسم المستكشف.

يعتمد اتساع الأصداء، في هذه الطريقة لتصوير الصدى، على تباين النسج المتجاورة في انضغاطيتها. غير أن الانضغاطية التي تتأثر بها موجة فوق صوتية لا تطابق المرونة التي يحس بها الطبيب عندما يضغط على الأعضاء بيده.

20.1. خصائص مرونة النسج

يشبه معظم الجسم، من وجهة النظر الميكانيكية، جسماً صلباً رخواً. يمكن وصف مرونة جسم صلب متماثل المناحيisotropic (وهي الحالة التي تكون خصائص الجسم فيها مستقلة عن الاتجاه المدروس) بالاستعانة بمعاملين مختلفين هما: معامل الانضغاطية (معامل المرونة الحجمي) Bulk modulus B ومعامل القص Shear modulus S (الجدول 14.1).

أما معامل الانضغاطية B لجسم صلب فهو عامل التناسب الطردي بين زيادة الضغط (الإجهاد) المطبقة على الجسم عمودياً عليه والتغير النسبي في حجمه. ويتغير تغيرات واسعة تشمل عدة مراتب عشرية بين نسيج عظمي ونسيج دهني، ولما كانت النسج البشرية الرخوة ضعيفة الانضغاطية جداً تميَّزت بارتفاع معامل انضغاطيتها (من مرتبة 10^9pascal). حيث يتطلب الأمر تطبيق زيادة كبيرة في الضغط على نسيج معين لتغيير حجمه بشكل ملحوظ. تتغير انضغاطية النسج الرخوة، عملياً بشكل ضئيل، من نسيج إلى آخر وهي قريبة من انضغاطية الماء. كما يجب التمييز في حالة استعمال الانضغاطية إذا ما كان النسيج مقيداً أم حراً في بعض جوانبه.

لكن النسيج الرخو في الجسم لا يسلك تماماً سلوك الماء بل سلوك جسم صلب. إذْ يتميز الجسم الصلب من السائل بإمكانية مقاومة القص (تطبيق قوى في اتجاهين متعاكسين في نقطتين متجاورتين) من دون إحداث جريان. وعندما نطبق إجهاد قص على جسم صلب، يقاوم هذا الأخير الإجهاد ويتشوه بشكل يتناسب طردياً مع الإجهاد المطبق. وإن معامل التناسب الذي يربط بين إجهاد القص والتشوه ليس إلاّ معامل القص S. يتعين الاقتراب من هذا السلوك الصلب بمقارنة انتشار الأمواج الطولية التي يحكمها ثابت يانغ مع انتشار الأمواج العرضية التي يحكمها معامل القص. ففي النسج اللينة، تقارب قيمة ثابت يانغ ثلاث مرات قيمة معامل القص. إن قيمة ثابت يانغ للفولاذ 200GPa ومعامل القص له 80GPa، في حين ثابت يانغ للمطاط مثلاً قرابة 4MPa ومعامل القص له 1MPa. ويقع معامل يانغ للكبد السليم بين 0.24 kPa 0.62kPa. وغالباً ما يعبر عن ذلك بنسبة بواسون: ν = lateral strain/ axial strain أي نسبة الانفعال العرضي إلى الانفعال الطولي.

يجري حالياً الاستفادة من سرعة تخامد الأمواج، وليس فقط تعيين سرعة انتشارها المستعملة في التصوير بالصدى وهذه التقنية مكملة للأولى.

20.2. تصوير الصدى التقليدي وخصائص مرونة الجسم

لمعامل القص أهمية كبيرة في الطب، لتغيره بشكل كبير من نسيج إلى آخر وبحسب الحالة المرضية للنسيج. فهو يقع بين 10^2pascal إلى 10^7pascal، مقارنة بـ 10^9pascal لمعامل الانضغاطية. يعتمد هذا المقدار بشكل رئيسي على قوى الروابط بين الخلايا، التي تتغير في الحالات المرضية للنسج. فيترجم كل من تشمع الكبد cirrhosis والتهابه hepatitis بتغير شديد في مرونة الكبد، ويمكن لمعامل القص في الثدي أن يتضاعف عشر مرات لدى مقارنة ورم سرطاني carcinoma في نسيج غدي بالنسيج السليم.

يبقى علينا تفسير عدم حساسية الأمواج فوق الصوتية لعامل قص النسج. للحصول على مقدرة فاصلة مكانية جيدة في تصوير الصدى تستخدم أمواج فوق صوتية قصيرة الطول الموجي ومِنْ ثَمَّ تواترات مرتفعة. وبذلك تتطلب المقدرات الفاصلة التي تقل عن الميلمتر تواترات تقدر بعدة ميغاهرتز، إذْ تسلك النسج التي تهتز بهذه التواترات سلوك موائع. وفي مثل هذه الأوساط لا تنتشر إلاّ أمواج الضغط التي لا تعتمد سرعتها إلاّ على عامل الانضغاطية، وهي سرعة مرتفعة جداً من مرتبة 1500 متر في الثانية في النسج، ولكنها ثابتة عملياً أو لا تتجاوز اختلافاتها %5 من نسيج إلى آخر. وبفضل تجانسية سرعة الانتشار يسهل تطبيق مبدأ تصوير الصدى. إذْ يحدد عمق نسيج معين بقياس الزمن الذي يستغرقه الصدى ليبلغ الكاشف. غير إن صور تصوير الصدى الحاصلة تكون ضعيفة التباين، الذي يعود لتغيرات معامل انضغاطية النسج المتجاورة.

إن الطريقة الأولى بسيطة جداً تكمن في استبدال تطبيق إجهاد ميكانيكي معاير بيد الطبيب الجاسة، الذي يلاحظ تأثيره بمفعول تصوير الصدى فوق الصوتي. إذْ يمكن أن يسهم المجس فوق الصوتي (شبكة التراجيم الكهرضغطية) الموضوع على جسم المريض بهرس النسج بشكل خفيف وبتشكيل صورة الأعضاء قبل تطبيق هذا الإجهاد وبعده في آن واحد. وبمقارنة الصورتين المتتاليتين يمكن قياس انزياحات كل نقطة من النسيج ووضع بطاقة للتشوهات ومِنْ ثَمَّ حساب الانفعالات التي يمكن عند ربطها بالإجهادات أن تعطي معامل المرونة المقابل الذي يقلب إلى صورة. يمكن للبطاقة التي يتم الحصول عليها بهذه الطريقة أن تساعد الطبيب في تقصّي المناطق القابلة للتشوه نوعاً ما.

وقد كان Jonathen Ophir من جامعة تكساس في هوستن أول من ابتكر هذه التقنية التي تدعى تصوير المرونة فوق الصوتي ultrasonic elastography في منتصف تسعينيات القرن الماضي، وقد لاقت بعض النجاح. ولكن عيب البطاقة الحاصلة الرئيسي يكمن في عدم كونها بطاقة لعامل القص. ولتصوير هذا المقدار يجب معرفة قيم الإجهادات المطبقة على كل نقطة من النسيج وقيم التشوهات

الحاصلة في آن معاً في تلك النقطة، ثم حساب نسبة هذين المقدارين. نجهل عملياً كيف تتوزع الإجهادات المتولدة في داخل النسيج لدى تطبيق قوة على سطح العضو ؛ إذ يؤدي وجود الأضلاع في حالة تصوير الثدي مثلاً إلى تعقيد كبير في توزع الإجهادات وحدوث خادعات كبيرة.

لتجنب هذه الخادعات والتعرّف على توزع الإجهادات داخل الأعضاء، يكمن الحل بالقيام بتصوير مرونة عابر أي يستبدل إجهاد قصير المدة، أي نبضة ميكانيكية، بالهرس السكوني الضئيل في الطريقة السابقة.

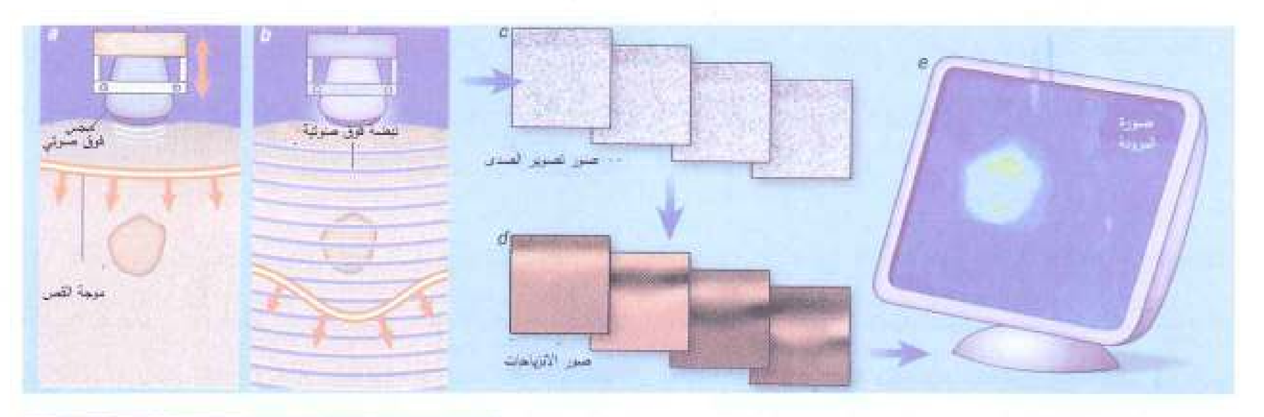
بتطبيق ضربة مقتضبة على جلد المريض، تتولد نبضة مرونة تنتشر في جسمه. تكافئ النبضة الشديدة القصر من وجهة النظر الرياضية مجموع عدة إشارات جيبية تختلف في تواتراتها واتساعاتها. تنتشر النبضة الميكانيكية المطبقة على جلد المريض إذن في داخل الأعضاء على شكل مجموعة من أمواج المرونة الجيبية، تقع تواتراتها الرئيسية بين نحو 10Hz و 200Hz وهي تواترات منخفضة جداً تنتمي لمجال الأمواج الصوتية المسموعة حتى المجال تحت الصوتي. من جهة أخرى لا تسلك النسج عند التواترات الشديدة الانخفاض سلوك السوائل، بل سلوك أجسام صلبة. حيث تنتشر في هذه الحالة أمواج القص في الجسم، بالإضافة إلى أمواج الضغط. وإذا كانت سرعة أمواج القص في نسيج معين تعتمد على معامل القص فيه (العلاقة 15.19)، فهي تنقل المعلومات التي تهمنا. تتصف سرعة أمواج القص في النسج الرخوة بأنها شديدة الانخفاض (تقع في الحالة النموذجية بين1m/s و10m/s) وبأن طول موجتها كبير (بضعة سنتمترات) عند التواترات التي تمكنها من الانتشار. كما تتغير سرعة هذه الأمواج بشكل كبير لدى انتقالها من نسيج ليفي إلى ضمينة inclusion قاسية. كيف يمكن الحصول على هذه المعلومات؟

من الصعب جداً استخدام أمواج القص مباشرة في تصوير النسج لعدم ثبات سرعتها وكبر طولها الموجي، الذي يترافق برداءة المقدرة الفاصلة. تكمن فكرة الوصول إلى هذه المعلومات في تصميم جهاز تصوير سريع إلى حد يمكنه من التعقب التدريجي لتقدم أمواج القص المنخفضة السرعة نسبياً. إذ تُحدِث أمواج القص في النسج لدى تقدمها فيها انزياحات بالنسبة إلى وضع توازنها تقدَّر ببضع عشرات المكرومترات.

يمكن باستخدام مصور للصدى فوق صوتي ينجز آلاف الصور في الثانية، قياس هذه الانزياحات، ورؤية تقدم أمواج القص ملمتراً فميلمتر بمقارنة الصور المتتالية.

وقد تم في عام 1998 تصنيع مثل هذا الجهاز للتصوير فوق الصوتي فائق السرعة. وقد كان أول مصور للصدى قادراً على سوق نحو 10000 صورة في الثانية للجسم البشري. يتم في هذا الجهاز إخضاع الجسم البشري لموجة فوق صوتية عريضة جداً حيزياً عدة آلاف المرات في الثانية، خلافاً لمصورات الصدى التقليدية التي تستعين بالمسح بحزمة فوق صوتية ضيقة. يتم من خلال هذا الجهاز التقاط الأصداء

القادمة من منطقة كبيرة في الجسم، بشبكة مكونة من عدة مئات من التراجيم الكهرضغطية وتحفظ في ذاكرة إلكترونية عملاقة. إذا أخذنا في الحسبان سرعة الأمواج فوق الصوتية في النسج (نحو 1500m/sec)، يقدر الزمن الذي تستغرقه الأمواج ذهاباً وإياباً في حالة العمق 15cm بنحو 200µs.




الشكل20.2. طريقة تصوير المرونة العابر.

وبتكرار الطلقات فوق الصوتية برتم 5000 مرة في الثانية وبالاستعانة بخوارزمية سريعة تعتمد على مفهوم الانقلاب الزمني time reversal (عكس الأصداء الملتقطة إلكترونياً ثم إعادة إصدارها نحو العضو المستهدف)، نحصل على صور فوق صوتية عالية المقدرة الفاصلة. يتم استنتاج انتشار أمواج القص من مقارنة الصور المتتالية. إذْ تحسب من الفلم الذي يتم الحصول عليه، قيم سرعة موجة القص، في كل نقطة من نقاط العضو المستكشف، الأمر الذي يسمح بوضع بطاقة لمعامل القص من خلال تطبيق العلاقة (15.19) $S=\rho v_s^2$ (الشكل20.2). حيث يقوم هزاز ميكانيكي مركب على مجس فوق صوتي بنقل نبضة ميكانيكية نحو العضو المدروس مدتها تساوي نحو عشرين ميلي ثانية. تنتشر هذه النبضة القصيرة على شكل موجة قص، منخفضة السرعة (a). يرسل المجس في أثناء هذا الانتشار عدة آلاف النبضات فوق الصوتية في الثانية (b) ويتلقى أصداءها، الأمر الذي يسمح ببناء فلم من صور الصدى (c). يمكن، بتحليل العلاقات بين هذه الصور، بناء بطاقات لانزياحات مادة النسج المتحرضة في المستوي الشاقولي بموجة القص (d). يمكن، بالاعتماد على هذه البطاقات، بناء صورة تمثل مرونة النسج في المستوي الشاقولي نفسه (معامل القص) (e).

20.3. جهاز تصوير الصدى فائق السرعة لتعقب أمواج المرونة

من أهم مزايا هذه التقنية التي تجمع بين موجتين تختلفان كثيراً في سرعتيهما، أن المقدرة الفاصلة للصورة النهائية لا تعتمد إلاّ على الطول الموجي الأقصر بين الموجتين اللتين تتعامل معهما. وعلى الرغم من أن الأمر يتعلق ببناء بطاقة لمعامل القص، فليس الطول الموجي لموجة القص (الذي يتجاوز

السنتمتر) الذي يحدد المقدرة الفاصلة، بل الطول الموجي للأمواج فوق الصوتية، الذي يقدّر بمرتبة الملمتر.

كيف يمكن للمرء أن يولد أمواج القص؟ وقع الخيار في بادئ الأمر على إحداث ضربات صغيرة ومتقضبة عن طريق مكبرات للصوت أو هزازات مغشّاة على جلد المريض. وكانت، خلافاً لما كان يعتقد، أن مثل هذه الضربات العمودية على سطح الجسم تكفي لإحداث أمواج القص. يسمح هذا الأمر باستخدام مجس تصوير الصدى نفسه كمطرقة صغيرة، من دون الحاجة إلى أداة أخرى.

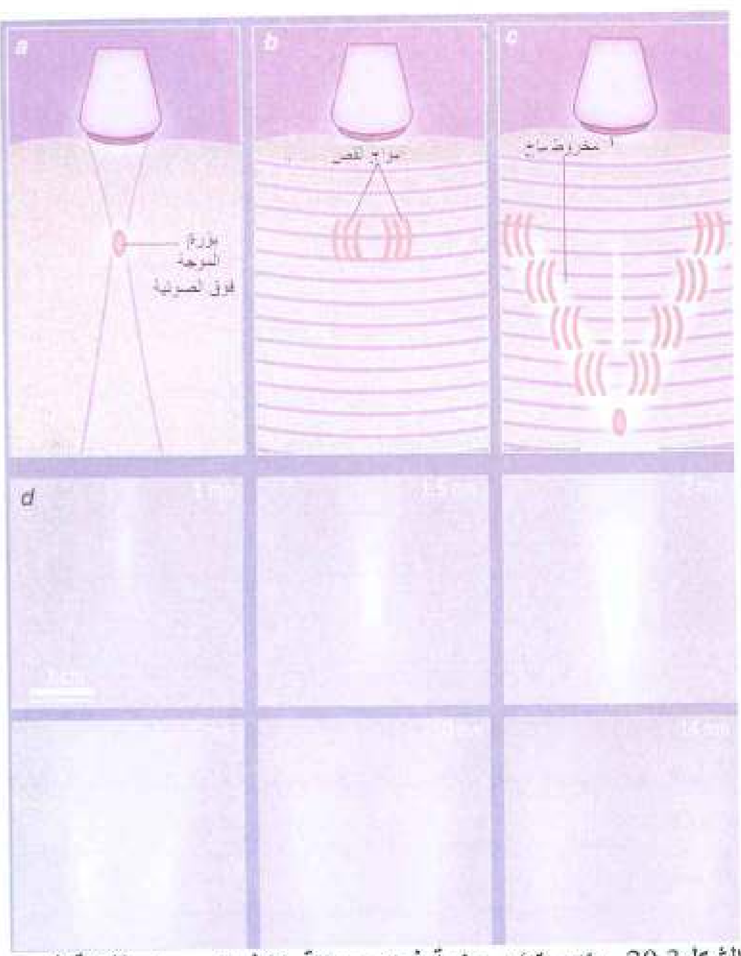
اختبرت تقنية تصوير المرونة هذه بتصوير الصدى السريع على عينات من الهلام تحوي ضمينة قاسية أسطوانية أظهرت الصور المتتالية تقدم موجة القص التي تتشوه بنيتها لدى عبورها ضمينة قاسية. نميز بوضوح، على بطاقة معامل القص التي ترسم بدءاً من فلم تصوير الصدى، الضمينة القاسية عن الوسط الرخو الذي يحيط بها: إن صورة المرونة هذه أهم بكثير من صورة تصوير الصدى التقليدي (انظر الشكل20.2). وقد جرى اختبار هذا الجهاز في معهد كوري في باريس ضمن إطار تشخيص سرطانات الثدي. وقد أعطى نتائج واعدة جداً. غير أن ضرورة تركيب المجس فوق الصوتي على هزازة ميكانيكية تحد من سهولة استخدامه.

ولتذليل هذه العقبة أدخل تحديث على الطريقة لجعلها أكثر ارتصاصاً compact بكثير وأكثر دقة في آن معاً. إذْ استعمل منبع لأمواج القص في النسج عن بعد باستخدام المجس فوق الصوتي فقط. وقد اقترح الفكرة Armen Sarvazyan من مخابر Artann في الولايات المتحدة قبل بضع سنوات، ولكن هذا الباحث لم تتوافر لديه أداة تصوير للصدى فائقة السرعة، ولم يتمكن مِنْ ثَمَّ من مراقبة أمواج القص هذه.

إن القيمة الوسطية للضغط الصوتي لدى مرور موجة فوق صوتية في نقطة معينة لن تكون معدومة على الرغم من خضوعها لتناوب من الانضغاطات والتخلخلات. وقد اكتشف هذه القيمة الوسطية المتبقية للضغط الصوتي Paul Langevin في بداية القرن العشرين ويدعى ضغط الإشعاع. وهكذا تطبق الموجة فوق الصوتية على النسج ضغطاً وفق منحى انتشارها، يسعى إلى إزاحة تلك النسج في اتجاه يعاكس اتجاه المنبع المصدر.

إن انزياحات النسج الناجمة عن ضغط الإشعاع ضعيفة جداً عموماً. غير أنه بتبئير حزمة من الأمواج فوق الصوتية بحيث تصبح كبيرة السعة، يمكن توليد انزياحات في المنطقة البؤرية من مرتبة عدة مكرومترات.

ومن هنا جاءت فكرة إحداث منبع قص في الجسم البشري باستخدام المجس فوق الصوتي نفسه في حالة تصوير الصدى فوق الصوتي. في المرحلة الأولى تقوم تراجيم المجس الكهرضغطية بتبئير قطار من الأمواج فوق الصوتية مدته نحو مئة مكروثانية (الشكل20.3). نحدث بذلك ضغطاً منخفض التواتر على النسج القريبة من النقطة البؤرية. تحدث عودة النسج إلى التوازن، أثناء تخامد هذه الدفعة، موجة قص موضعياً. نجعل المجس فوق الصوتي في هذه الحالة في نمط التصوير فائق السرعة لتعقب انتشار الموجة المحدثة بهذه الطريقة. بهذه التقنية يمكن تجاوز المهتز كلياً.



الشكل20.3. يؤدي تبئير حزمة فوق صوتية خلال كسر من الثانية في منطقة صغيرة داخلية إلى تطبيق دفعة عليها (a). في نهاية هذه الدفعة تؤدي عودة النسج إلى التوازن إلى توليد أمواج قص (b). وبإزاحة نقطة التبئير، ينزاح منبع أمواج القص. إذ يمكن إزاحة النقطة البؤرية بسرعة تزيد على سرعة الصوت، أي تزيد على سرعة انتشار أمواج القص في الوسط. نكون في هذه الحالة في نظام اختراق جدار الصوت: إذ يتشكل مخروط ماخ الذي تكون شدة القص وفقه مرتفعة جداً (c). تعتمد فكرة التضخيم هذه على التصوير بالقص الفائق الصوتي. تجسد سلسلة الصور (d) موجة قص متولدة بمنبع تتم إزاحته بسرعة ستة أمتار في الثانية أي بسرعة أكبر من سرعة الصوت بثلاث مرات (يدل سلم الرماديات على اتساع إزاحة المادة من 0 إلى 4μm).

20.4. منبع قص يتحرك بسرعة تتجاوز سرعة الصوت

تنخفض سعة موجة القص المحدثة في النقطة البؤرية تدريجياً مع ابتعاد الموجة عن المنبع وسرعان ما تصبح غير قابلة للملاحظة. وللتغلب على هذه الصعوبة تمت الاستفادة من مفهوم اختراق جدار الصوت (الأمواج الصادمة) لطائرة. إن الطائرة منبع متنقل للضجيج، وعندما تتجاوز سرعتها سرعة الصوت (Mach1 فما فوق)، تتداخل الأمواج الصوتية التي تصدرها تداخلاً بنّاءً وفق مخروط يدعى مخروط Mach، وبتعبير آخر مجرد أن تخترق الطائرة جدار الصوت، تصبح سعة الضجيج الصوتي كبيرة جداً على هذا المخروط. وبالمثل يقوم المنبع الصغير لأمواج القص الذي يأخذ دور الطائرة، والمتولد بفضل ضغط الإشعاع. وبما أنه يمكن بفضل مرونة الإ__ بات التي تتحكم بالتراجيم الكهرضغطية تعديل

موضع منبع أمواج القص حسب الرغبة. حتى إننا نستطيع إزاحته بسرعة تتجاوز سرعة الصوت في الثدي، وبذلك توليد حقل شديد جداً لأمواج القص ينتشر على شكل مخروط ماخ (انظر الشكل20.4).

تبلغ إزاحات النسج مِنْ ثَمَّ بضع عشرات المكرومترات ويمكن لهذه الموجة أن تجتاز كامل ثخانة عضوٍ معين من دون أن تتخامد كثيراً. وبذلك تسمح هذه التقنية الجديدة في تصوير أمواج اختراق جدار الصوت القصّية (باللغة الإنكليزية) supersonic shear imaging بإحداث أمواج عالية السعة في النسج وبقياس خصائص المرونة بحساسية عالية.

الشكل20.4. صورة تصوير الصدى فوق الصوتي للثدي (إلى اليسار) لا تكشف وجود ورم إلا بصعوبة. في حين أن صورة المرونة (إلى اليمين التي تم الحصول عليها للعضو نفسه) تظهر بوضوح منطقة أكثر قساوة بكثير من النسج المحيطة: وهي توافق ورماً سرطانياً.

اختبرت هذه التقنية على نسج بيولوجية شبحية أي على أجزاء من مواد خصائصها الفيزيائية تشبه خصائص النسج الحية، فأظهر فلم تصوير الصدى الذي يتم الحصول عليه برتم 3000 صورة في الثانية كيفية تشويه الضمينة لأمواج القص في أثناء انتشارها (الشكل20.2d). وباستخدام خوارزمية الانقلاب الزمني المناسبة يتم بناء بطاقة مرونة الوسط الذي تعبره الأمواج، وهي صورة كمية تظهر الضمينة بوضوح.

إن معدل 3000 صورة في الثانية يكفي 30ms لتسجيل سلسلة من مئة صورة متتالية، تظهر موجة قص تنتشر بسرعة مترين في الثانية على عمق ستة سنتمترات. تعد هذه المدة قصيرة جداً: إذْ تكون الحركات الداخلية لأعضاء المريض في الدورة القلبية أو التنفسية أبطأ بكثير وغير مزعجة لتقنية التصوير على الإطلاق، وبذلك ندرك أهمية هذه الطريقة في تشخيص الإمراضيات الورمية (وبخاصة في أعضاء كالثدي أو الكبد أو الخصى أو الغدة الدرقية) أو في تعقب مرونة القلب أثناء الدورة القلبية.

يجدر بالذكر أن الأمواج فوق الصوتية لا تمثل الطريقة الوحيدة لتصوير المرونة، بل ثمة طريقة أخرى مهمة أيضاً بكثير تعتمد على التصوير بالتجاوب المغنطيسي النووي MRI كما سنرى في الفصل22 مع التصوير بالمرونة.

الفصل الحادي والعشرون

توليد الحقول المغنطيسية والخواص المغنطيسية للمادة

Magnetic Field Generation & Magnetic Properties of Materials

21.1. مقدمة

ندرس في هذا الفصل أشكالاً مختلفة للتيارات الكهربائية والحقول المغنطيسية الناتجة عنها، والدور الذي تؤدّيه ثنائيات أقطاب مغنطيسية لكي نفسر الفاعلية الكهربائية (السيالة العصبية) التي تجري في الدماغ لدى تعرض الفرد لتنبيه حسي معين بصري أو سمعي أو استعرافي من جهة، وللتعرف من جهة أخرى على آلية توليد الحقول المغنطيسية المنتظمة التي تطبق في طريقة التصوير بالتجاوب المغنطيسي(الفصل22). نتناول أيضاً ظاهرة التحريض المغنطيسي لنتمكن من فهم آلية الكشف عن الحقول المغنطيسية التي يصدرها الدماغ بالسكويداتSQUIDS التي تعتمد على الناقلية الفائقة (الفصل23). نتناول في هذا الفصل أيضاً تأثير الحقل المغنطيسي في المادة عموماً حتى نتمكن من التمييز بين المواد الفرومغنطيسية (الحديدية المغنطة) التي يمكن استخدامها في توليد الحقول المغنطيسية الشديدة والمواد البرامغنطيسية (الموافقة المغنطة) والتي تستجيب لظاهرة التجاوب المغنطيسي النووي (الفصل22) والمواد العكسية المغنطة التي تستجيب لظاهرة الناقلية الفائقة (الفصل23) التي تحضر منها السكويدات التي تستخدم في قياس الحقول المغنطيسية الضعيفة التي يصدرها الدماغ أثناء قيامه بفاعلياته المختلفة. وهي ضرورية أيضاً لشرح سلوك ملفات التواتر الراديوي في التصوير بالتجاوب المغنطيسي (الفصل22) التي تستخدم في إرسال واستقبال موجة التواتر الراديوي في التصوير بالتجاوب المغنطيسي.

نبدأ دراستنا بالحقول المغنطيسية المتولدة من تيارات كهربائية تسري في دارات مختلفة، ثم التحريض المغنطيسي وأخيراً سلوك المادة بوجود حقل مغنطيسي.

21.2. الحقول المغنطيسية للتيارات الكهربائية

يولد التيار الكهربائي المكون من عدد كبير من الشحنات الكهربائية المتحركة حقلاً مغنطيسياً تتعلق شدته بشكل الناقل الذي يعبره التيار. على سبيل المثال:

21.2.1. الحقل المغنطيسي لتيار مستقيم لا نهائي في الطول

تأخذ خطوط الحقل شكل منحنيات مغلقة، مماسة في كل نقطة منها لشعاع الحقل المغنطيسي H، ويتناسب تباعدها فيما بينها طردياً مع شدة الحقل. تسمح حبيبات برادة الحديد أو إبر البوصلة، بتجسيد هذه الخطوط لأن الطيف المغنطيسي الذي تشكله البرادة يأخذ شكل خطوط الحقل. وهي في هذه الحالة دوائر لها المركز نفسه ومحورها السلك المستقيم (الشكلان 21.1a,b). و تقع الحقول في مستوٍ يتعامد مع السلك ويرتبط اتجاهها باتجاه التيار بقاعدة البزال. أما شدته فتتناسب طردياً مع شدة التيار I وعكسياً مع البعد r بين السلك والنقطة المفترضة (الشكل21.1c):

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{2I}{r} \qquad (21.1)$$

حيث $\frac{\mu_o}{4\pi} = 10^{-7}$ في جملة الواحدات الدولية، و μ_0 الإنفاذية المغنطيسية للخلاء magnetic permeability وهي تميز الخلاء (أو الهواء) من حيث خواصه المغنطيسية. يرتبط μ_0 وثابت السماحية الكهربائية للخلاء ε_0 بالعلاقة الأساسية:

$$\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1 \qquad (21.2)$$

حيث $c = 3.10^8 m/s$ سرعة الضوء في الخلاء.

يوضح مخطط الشكل21.1c كيفية استخدام قاعدة البزال أو اليد اليمنى في تحديد اتجاه خطوط الحقل.

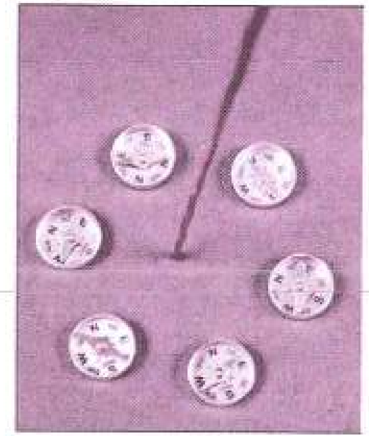
21.2.2. الحقل المغنطيسي لتيار دائري مستوٍ

يسري التيار I في هذه الحالة في حلقة دائرية نصف قطرها R يعبرها تيار (الشكل21.2). يكون الحقل في مركز هذه الحلقة عمودياً على مستويها، ويُعطى اتجاهه بقاعدة البزال وتعطى شدته بالعلاقة

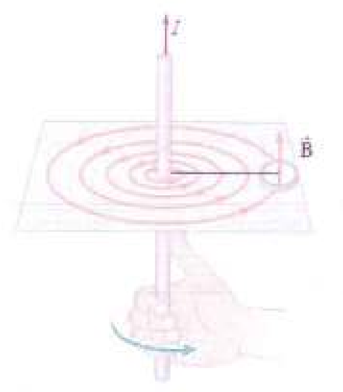
$$B = \frac{\mu_0}{2}\frac{I}{R} \qquad (21.3)$$



(a) صورة سلك طويل، وبرادة الحديد تتخذ اتجاه الحقل المغنطيسي.



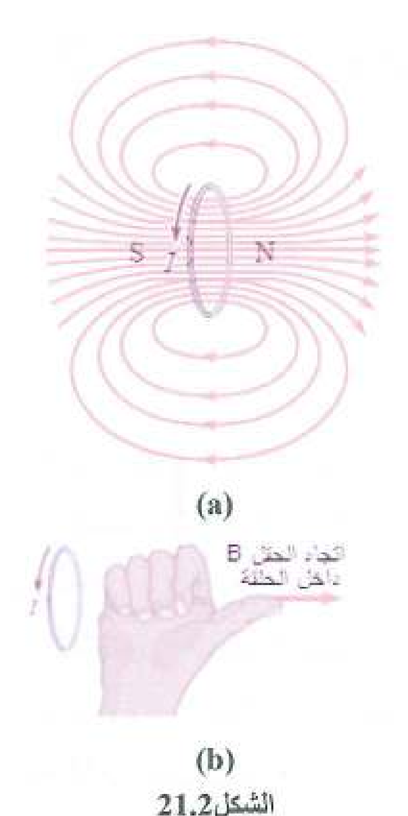
(b) تتخذ البوصلات المغنطيسية اتجاه الحقل المغنطيسي للتيار.



(c) مخطط استخدام قاعدة اليد اليمنى في التعرف على اتجاه خطوط الحقل.
الشكل21.1. الحقل المغنطيسي لسلك مستقيم.

يبين الشكل21.2a خطوط الحقل المغنطيسي التي تولدها حلقة تيار دائري.

في حين يبين الشكل21.2b استخدام أصابع اليد اليمنى الثلاث في تعيين اتجاه الحقل داخل الحلقة.



الشكل21.2

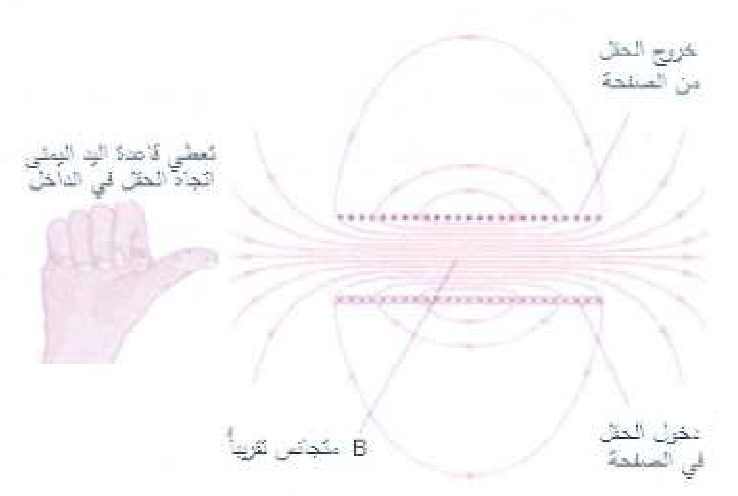
21.2.3. الحقل المغنطيسي لملف لولبي Solenoid

يسري التيار في هذه الحالة في ملف مكون من عدد من الحلقات المتلاحمة الملتفة حول أنبوب مجوف عازل (الشكل21.3a) فإذا كان طوله كبيراً بالنسبة إلى مقطعه، يكون الحقل المغنطيسي في داخله نسيقاً عملياً (ما عدا في جوار الحواف) ومنحاه يوازي محور الحلقات، ويعطى اتجاهه وفقاً لقاعدة البزال، وشدته من الشكل:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{L} \tag{21.4}$$



21.3a. ملف لولبي



الشكل21.3b. خطوط الحقل المغنطيسي التي يولدها ملف لولبي. كل نقطة في الشكل تمثل السلك الذي يعبر مستوي الصفحة والتيار يخرج منها، وكل إشارة ضرب تمثل السلك وهو يعبر مستوي الصفحة والتيار يدخل في الصفحة.

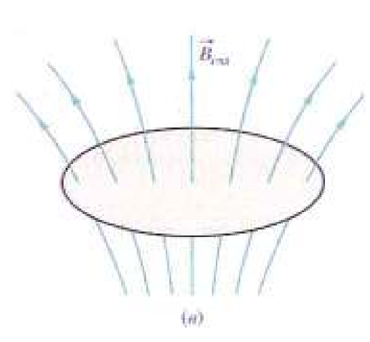
حيث N عدد حلقات الملف، I شدة التيار في اللفة وL طول الملف. تأخذ خطوط التحريض المغنطيسي شكل منحنيات مغلقة. وقد اصطلح أن يدعى الوجه أو القطب الذي تخرج منه خطوط الحقل (الشكل21.3b) الوجه أو القطب الشمالي، في حين يدعى الوجه أو القطب الذي تدخل فيه الخطوط الوجه أو القطب الجنوبي.

21.3. التحريض الكهرطيسي

تولد الشحنة الكهربائية الثابتة، في جوارها المحيط، حقلاً كهربائياً يمكنه تحريك شحنة ثابتة. كما تولد الشحنة المتحركة أو التيار المستمر حقلاً مغنطيسياً يمكنه أن يتفاعل مع شحنة أخرى متحركة أو تيار آخر. وقد برهن فاراداي *Faraday* من جهة أخرى على أن الحقل المغنطيسي المتغير يولد تياراً كهربائياً في حلقة مغلقة ومِنْ ثَمَّ يقوم بتحريك الشحنات الكهربائية أي يولد حقلاً كهربائياً. فهل ثمة علاقة بين الحقلين الكهربائي والمغنطيسي المتولدين؟

21.3.1. تدفق شعاع التحريض المغنطيسي خلال سطح معين

ليكن الملف ذو السطح s و $\vec{n}$ الناظم عليه (الشكل21.4)، والموضوع في حقل تحريض مغنطيسي نسيق منتظم $\vec{B}$ (سنتحدث لاحقاً عن الاختلاف بين الحقل المغنطيسي وحقل التحريض المغنطيسي). فإذا افترضنا $\vec{s}=\vec{n}\,s$ يمكن تمثيل تدفق الحقل المغنطيسي Φ عبر السطح بالعلاقة:



الشكل21.4. تدفق الشعاع B عبر السطح s.

$$\Phi=\vec{B}\cdot\vec{s}=B\,s\cos\theta \qquad (21.5)$$

وهو مقدار سلّمي. فإذا قدر B بالتسلا T و s بالمتر المربع m^2 فإن التدفق يقدر بالويبر *Weber (Wb)*. يتناسب تدفق الحقل المغنطيسي وفقاً لهذه العلاقة طردياً مع السطح الذي يخترقه الحقل ومِنْ ثَمَّ مع عدد خطوط التحريض التي تعبر السطح.

21.3.2. القوة المحركة الكهربائية المتحرضة _ قانون فاراداي

يمكن إحداث تغير في تدفق حقل التحريض المغنطيسي إما بتغير B وإمّا بتغير s. وبالاعتماد على المغنطيس في الشكل21.5 يمكن إحداث تغيرات التدفق إما بتقريب المغنطيس من الملف وإمّا بإبعاده عنه وفق محوره.



الشكل21.5. التيار المتحرض نتيجة لتغير التدفق في الدارة.

تدل التجربة على أنه:

– مهما يكن شكل تغير $\vec{B}$ فإنه يمكن أن يظهر تيار متحرض i في الدارة طالما كان هذا التغير مستمراً، ويتوقف عندما تستقر الظاهرة.

عندما يتغير التدفق عبر دارة معينة بمقدار $\Delta\Phi$ خلال Δt، تعطى القوة المحركة الكهربائية المولدّة للتيار المتحرض في هذه الدارة بقانون فارادي $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$، وفي لحظة معينة:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{21.6}$$

تدل الإشارة السالبة على أن إشارتي القوة المحركة الكهربائية المتحرضة وتغير التدفق متعاكستان دائماً، وهذا هو مضمون قانون لنز Lenz حيث يعكس التيار المتحرض دائماً السبب الذي أدى إلى حدوثه.

يعود التيار المتحرض المتولد نتيجة لتغير تدفق الحقل المغنطيسي في دارة معينة، في الواقع، إلى توليد حقل كهربائي متحرض $\vec{E}_i$ يحرك إلكترونات الناقل في تلك الدارة طالما كان تغير التدفق مستمراً. ويكفي وجود تغير في $\vec{B}$ ليتولد حقل كهربائي متحرض يستمر ما دام التغير مستمراً.

فإذا كانت أداة معينة تسمح بتغير الحقل المغنطيسي $\vec{B}$ بشكل دوري، كالأداة المهتزة بتواتر معين مثلاً، فإن الحقل الكهربائي المتولد سيتغير بالتواتر نفسه. وقد وضع ماكسويل الفرضية المعاكسة: يمكن للحقل الكهربائي المتغير أن يحرض حقلاً مغنطيسياً.

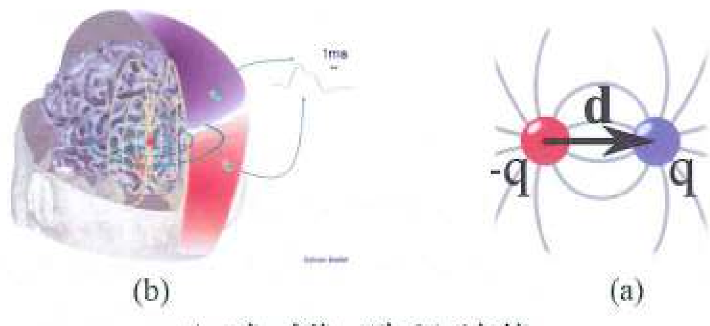
21.4. ثنائيات الأقطاب

21.4.1. ثنائي القطب الكهربائي

تشكل الشحنتان الكهربائيتان النقطيتان المتساويتان في المقدار والمتعاكستان في الإشارة واللتان تبعد إحداهما عن الأخرى بمسافة معينة ثابتة d، ثنائيَّ قطب كهربائي، يتميز بشعاع العزم الكهربائي $\vec{p}$:

$$\vec{p} = q\vec{d} \tag{21.7}$$

المحمول على $\vec{d}$ (الشكل21.6a)، ويتجه من الشحنة السالبة نحو الشحنة الموجبة وطويلته qd:



(b) (a)

الشكل21.6. ثنائي القطب الكهربائي.

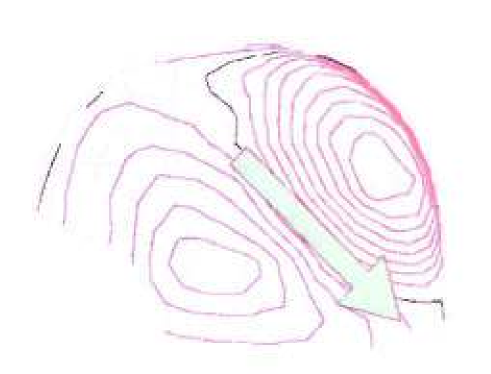
فإذا كان $q = 1Coul$ و $d = 1m$ فإن $\vec{p} = 1Coul.m$ في الجملة الدولية. ولعدم تلاؤم هذه الوحدة مع السلم الجزيئي يجري عملياً اختيار $q = 0.33\times10^{-19}C$ و $d = 10^{-10}m$ ليكون $p = 1debye(D)$

$$1D = 0.33\times10^{-29}\,C.m$$

يمثل الشكل21.6b ثنائي قطب كهربائي يتشكل في الفص الصدغي من الدماغ أثناء تعرضه لتنبيه سمعي.

21.4.2. ثنائي القطب المغنطيسي

إن خطوط الحقل المغنطيسي الظاهرة في الشكل 21.2a لحلقة من سلك يعبرها تيار كهربائي تشبه خطوط الحقل الكهربائي المتولدة من ثنائي قطب كهربائي الشكل 21.6a، لذلك تدعى التركيبة ثنائي قطب مغنطيسي. ويمكن التعرف على الناظم الموجب ومِنْ ثمَّ السطح الشمالي من خلال قاعدة البزال بالاعتماد على اتجاه التيار، وبهذا التشابه تتولد فكرة القطب الشمالي والقطب الجنوبي ليمثل ثنائي القطب المغنطيسي بالعزم المغنطيسي M في الشكلين 21.8,7. يظهر في الشكل 21.7 ثنائي قطب مغنطيسي يرافق تشكل ثنائي قطب كهربائي في الدماغ أثناء التعرض لتنبيه معين.



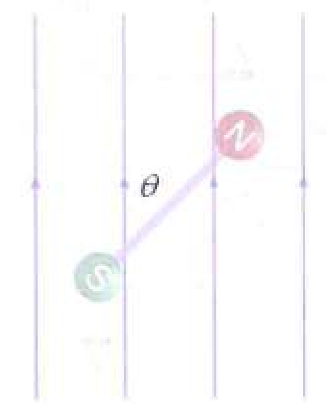
الشكل21.7. ثنائي قطب مغنطيسي في القشرة البصرية يرافق تشكل ثنائي القطب الكهربائي.

21.4.3. ثنائي القطب المغنطيسي في حقل مغنطيسي نسيق(منتظم)

مفهوم العزم المغنطيسي

عندما توجد البوصلة في حقل مغنطيسي فإنها تأخذ اتجاهاً معيناً في هذا الحقل لتمتعها هي الأخرى بخصائص مغنطيسية. فهي تتألف من إبرة ممغنطة لها قطب شمالي وآخر جنوبي. يمكن التعبير هنا عن هذه الخاصة المغنطيسية بشعاع $\vec{M}$ يطلق عليه اسم العزم المغنطيسي؛ تعد شدته مقياساً لمغنطة الإبرة ومنحاه هو محورها ويتجه من الجنوب نحو الشمال.

لذلك فإنه عندما يقع عزم مغنطيسي $\vec{M}$ في حقل مغنطيسي $\vec{B}$ (الشكل21.8) فإنه يأخذ اتجاهاً معيناً في هذا الحقل، يستلزم إذا أردنا إعادته إلى الوضع الذي كان عليه في غياب الحقل، أن نصرف طاقة معينة. وبتعبير آخر: يتمتع كل عزم مغنطيسي $\vec{M}$ يقع في حقل مغنطيسي $\vec{B}$ بطاقة كامنة E_P تتناسب مع كل من شدة العزم المغنطيسي والمجال المغنطيسي والزاوية المحصورة بينهما، وتكون هذه الطاقة صغرى عندما يتفق الشعاعان في المنحى والاتجاه:



الشكل21.8. ثنائي القطب المغنطيسي في حقل مغنطيسي.

$$E_P = -M\,B\,\cos(M,B) \qquad (21.8)$$

تدل إشارة الناقص على وجوب صرف الطاقة لإزاحة العزم عن منحى توازنه. يمكن كتابة العلاقة السابقة على النحو:

$$E_P = -\vec{M} \cdot \vec{B} \qquad (21.9)$$

وحيث إن الطاقة الكامنة E_P تنتج من الجداء السلمي لشعاعين فهي ليست مقداراً شعاعياً. وأما القوة التي تفعل في هذا العزم فيمكن التعبير عنها بعزم المزدوجة التي تسعى إلى تدوير العزم المغنطيسي إلى أن يأخذ اتجاه الحقل المغنطيسي. يتناسب عزم هذه المزدوجة طردياً مع كل من العزم المغنطيسي والحقل المغنطيسي، ويكون أعظمياً في حال تعامد الشعاعين وينعدم في حال توازيهما أي:

$$\Gamma = M\,B\,\sin(M, B) \qquad (21.10)$$

وهي تأخذ اتجاهاً معيناً في الفراغ أي تمثل شعاعاً كاذباً يمكن كتابته على النحو:

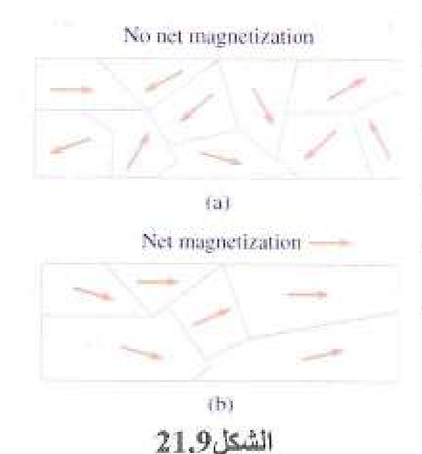
$$\vec{\Gamma} = -\vec{M} \wedge \vec{B} \qquad (21.11)$$

21.5. سلوك المادة بوجود حقل مغنطيسي

افترضنا في الفقرة 21.2 أن النواقل التي تجتازها التيارات الكهربائية و تولد الحقل المغنطيسي موضوعة في الخلاء (عملياً في الهواء) يرمز لهذا الحقل عادة بـ H . ونتناول الآن دراسة سلوك المادة بوجود الحقل المغنطيسي. تدل التجربة على أن أي مادة تكتسب بتأثير الحقل المغنطيسي الخارجي $B_0 = \mu_0 H$ عزماً مغنطيسياً أي تتمغنط (تصبح مغنطيساً أو ثنائي قطب مغنطيسي). يولد كلّ ثنائي قطب مغنطيسي حقلاً مغنطيسياً، مجموع هذه الحقول B' ينضم إلى الحقل B_0 الذي يولده ليعطي في نقطة معينة الحقل المحصل الذي يسمى حقل التحريض المغنطيسي.

تتأثر جميع المواد بالحقل المغنطيسي فتتمتع بخصائص مغنطيسية مقابلة. غير أن تأثر معظم المواد ضئيلة. فإذا ما وضع قضيب مغنطيسي بالقرب من قطعة من الخشب أو الألمنيوم أو البلاستيك، فلن يحدث بينهما تأثر ملحوظ. ويطلق على هذا النوع من المواد، عموماً، مواد لا مغنطيسية.

أما المواد التي تخضع لقوة ملموسة يمكن ملاحظتها بفعل مغنطيس مجاور فتدعى مواد حديدية المغنطة ferromagnetic (ترجع كلمة -ferro باليونانية إلى الحديد الذي يعدّ مثالاً جيداً لها). تتكون المواد الحديدية المغنطة ferromagnetic materials عادة من مناطق domains مغنطيسية، وهي مناطق تتوجه فيها ثنائيات الأقطاب الذرية atomic dipoles كلها في اتجاه واحد، بحيث تتصف المنطقة بعزم ثنائي قطب dipole moment شديد.



الشكل21.9

وعندما تكون المناطق domains المغنطيسية في جسم معين موجهة عشوائياً (الشكل21.9a)، لن تكون هناك مغنطة magnetization إجمالية للجسم. بينما عندما تكون المناطق المغنطيسية في الجسم موجهة (الشكل21.9b) وفق اتجاه مفضل من اليسار إلى اليمين مثلاً، يكون للجسم مغنطة إجمالية، وقد يصبح الحقل الناتج عن هذه المغنطة من مرتبة الحقل المطبق فنكتب:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \qquad (21.12)$$

يتغير الحقل الحقيقي إذن من نقطة لأخرى بين الجزيئات. والمقصود بالقيمة $\vec{B}$ حينئذ القيمة الوسطية للحقل العياني (أو الماكروسكوبي).

لتفسير تمغنط الأجسام تقليدياً افترض أمبير أن جزيئات المادة تحوي تيارات دائرية. وكل تيار له عزم مغنطيسي يولد في الفضاء المحيط به حقلاً مغنطيسياً (الفقرة21.1) وقد تحققت فرضيته بعد أن كشف النقاب عن بنية الذرة وعن العزوم المغنطيسية التي تنشأ عن حركة كل من الإلكترونات والنكليونات. فإذا خضع هذا الجسم لحقل مغنطيسي خارجي اكتسبت العزوم المغنطيسية للجزيئات توجهاً راجحاً في اتجاه معين، ونتيجة لذلك يتمغنط الجسم أي إن عزمه المغنطيسي المحصل يغدو مختلفاً عن الصفر (ويقال: إنّه أصبح مغنطيساً).

توصف المادة بالعزم المغنطيسي لوحدة الحجم. يسمى هذا المقدار شعاع التمغنط $\vec{J}$. ويعرَّف في نقطة ما من الوسط المتمغنط بالعلاقة:

$$\vec{J} = \frac{\Delta\vec{M}}{\Delta V} \qquad (21.13)$$

حيث ΔV حجم لا متناه في الصغر فيزيائياً يحيط بالنقطة المدروسة، و $\Delta\vec{M}$ العزم المغنطيسي المحصل لكل الجزيئات الأخرى.

توجد علاقة بسيطة بين الحقل المغنطيسي H وحقل التحريض المغنطيسي $\vec{B}$ في الخلاء تعتمد على الواحدات المستعملة فقط:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \qquad (21.14)$$

حيث تسمى μ_0 نفوذية الخلاء و نستنتج أن أبعاد $\vec{H}$ هي IL^{-1} ، ويعبر عن وحدته في الجملة الدولية بالأمبير / متر (A/m). تبين التجربة أن التمغنط في أي نقطة من مادة معينة يرتبط بالحقل المغنطيسي المطبق بالعلاقة:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \qquad (21.15)$$

حيث χ ثابت لا أبعاد له يدعى الطواعية المغنطيسية. إلاّ أن هذين الشعاعين يمكن أن يختلفا في الاستقامة في الأوساط غير المتماثلة المناحي. وبحسب قيمة χ يمكن تعريف ثلاثة أنماط لسلوك المادة.

21.5.1. الأوساط العكسية المغنطة *Diamagnetic*

حيث يعاكس العزم المتحرض في هذه الأوساط الحقل الأصلي، ولهذا فهو سالب. ومفعول المغنطة المعاكسة موجود في كل الأجسام ولو أنه ضعيف جداً ومستقل عن درجة الحرارة

$$\chi \cong -10^{-6}$$

لهذه المواد أهمية كبيرة. فظاهرة الناقلية الفائقة التي تستخدم في عدد من التطبيقات الطبية تقابل طواعية عكسية قريبة من الواحد.

21.5.2. الأوساط الموافقة(المسايرة) المغنطة *Paramagnetic*

هي الأوساط التي تبدي، بوجود حقل مغنطيسي خارجي، عزماً محرَّضاً يأخذ اتجاه حقل التحريض نفسه وضعيفاً عموماً:

$$\chi \cong 10^{-4} - 10^{-6}$$

والمغنطة الموافقة هي المعنية بالتجاوب المغنطيسي النووي. وسنرى أن النوى تتمتع بعزم يظهر بوجود حقل. وما تزال الأوساط الموافقة المغنطة تدرس كعوامل تباين في التجاوب المغنطيسي النووي.

21.5.3. الأوساط الحديدية المغنطة *Ferromagnetic*

أوساط تبدي عزماً مغنطيسياً حتى في غياب الحقول المحرّضة وتشكل المغانط الدائمة المألوفة:

$$\chi \cong 1 - 10^{6}$$

فهي إذاً شديدة المفعول، وقوى التأثير المتبادل في هذه الحالة هائلة وعليها تلقى تبعات محاذير اللجوء إلى التجاوب المغنطيسي النووي (كالبدائل المعدنية أو البراغي المزروعة في الفك).

يجدر بالذكر أن المعادن ليست جميعها حديدية المغنطة، وأن المواد البدلية الجراحية غالباً ما تصنع من خلائط يحسن تحديد نسبة المواد الحديدية المغنطة فيها.

هذا وإن طواعية كل من الأوساط العكسية المغنطة أو الموافقة ثابتة القيمة تقريباً، في حين أن الطواعية الحديدية تتبع شدة الحقل المغنطيسي. كثيراً ما يجري التعامل مع الطواعية الكتلية التي تعرف بالعلاقة:

$$\chi_m = \frac{\chi}{\rho} \qquad (21.16)$$

حيث ρ الكتلة الحجمية للوسط. وفيما يلي قيم χ_m لبعض المواد مقدرة بالوحدة $10^{-9}m^3/Kg$ في الدرجة $18^\circ C$.

وهكذا نرى أن شعاع التمغنط يتفق في الاتجاه مع الحقل المغنطيسي في الأوساط الموافقة المغنطة والحديدية المغنطة ويعاكسه في الأوساط المعاكسة المغنطة.

21.5.4. الحقل والتحريض المغنطيسيان في المادة

يعرف الحقل المغنطيسي في المادة بالعلاقة:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \qquad (21.17)$$

إن هذا المقدار بالذات هو المقصود بالعلاقة (21.15) بوصفه مقداراً يعين التمغنط. ويمكن كتابة العلاقة (21.17) بالشكل:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}) \qquad (21.18)$$

وباستعمال العلاقة 21.15 يمكن أن نكتب:

$$\vec{B} = \mu_0(1+\chi)\vec{H} \qquad (21.19)$$

يطلق على المقدار:

$$\mu_r = 1 + \chi \qquad (21.20)$$

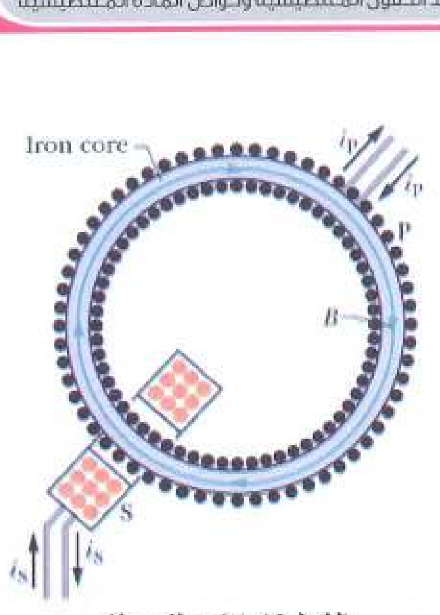
اسم معامل النفوذية المغنطيسية النسبية للمادة، كما يطلق على المقدار $\mu \equiv \mu_0\mu_r$ اسم معامل النفوذية المغنطيسية المطلقة. يجدر بالذكر أن معامل النفوذية المغنطيسية النسبية يمكن أن يكون أكبر من الواحد أو أصغر منه، وهو ثابت في حالة مادة معينة إلاّ في الأوساط الحديدية. ومِنْ ثَمَّ يمكن كتابة العلاقة 21.19 بالشكل:

$$\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu\vec{H} \qquad (21.22)$$

في الخلاء يكون $\chi = 0$ ومِنْ ثَمَّ $\vec{J} = 0$، ومن ثم $\mu_r = 1$ و $\vec{B} = \vec{B}_0 = \mu_0\vec{H}$

لنوضح الآن المعنى الفيزيائي للنفوذية المغنطيسية النسبية μ_r. لنتأمل ملفاً حلقياً أو ملفاً طويلاً جداً يجتازه تيار كهربائي وموضوع في الخلاء. إن شدة حقل التحريض المتولد في داخل الملف $\vec{B}_0 = \mu_0\vec{H}$. لندخل الآن ضمن الملف حلقة (سواراً) (الشكل21.10) مصنوعة من مادة حديدية المغنطة فيبقى الحقل المغنطيسي $\vec{H}$ على قيمته ضمن الحلقة في حين أن حقل التحريض المغنطيسي في نقطة معينة يساوي

$$\vec{B} = \mu_0\mu_r\vec{H} = \mu_r\vec{B}_0 \qquad (21.23)$$



الشكل21.10. ملف حلقي

أي إن شدة التحريض المغنطيسي في هذه الحالة أكبر μ_r مرة منها في حالة الخلاء.

يستفاد من هذه الخاصية في صنع مغانط كهربائية دائمة شديدة تستخدم في التصوير بالتجاوب المغنطيسي.

21.6. الخصائص المغنطيسية الذرية

يمكن أن نقارن سلوك المواد المغنطيسية الجهرية بالخصائص المغنطيسية المجهرية ،على المستوى الذري، التي تناولناها في الفصل2 وعلى المستوى النووي في الفصل12.

إن شدة العزم المداري الإلكتروني تفوق ألف مرة شدة العزم المداري النووي (والسبب يعود طبعاً لفرق الكتلة بين الإلكترون ومكوّني النواة، الفصل2 والفصل12)، ولكن الترتيب الذي تنتظم وفقه الإلكترونات (حيث تتزاوج وفق سبينات متعاكسة في الاتجاه) يجعل المغنطيسية النووية هي السائدة في أغلب الأوساط، وبذلك يمكن تعريف في حادثة التجاوب:

- تجاوب المغنطة الموافقة الإلكترونية EPR *Electronic Paramagnetic Resonance* الشديد نسبياً والذي يمكن أن يظهر في بعض الأوساط فقط التي يطلق عليها اسم الأوساط الموافقة المغنطة الإلكترونية. يجدر بالذكر أن المغنطة الموافقة الإلكترونية لذرات الحديد في الهموغلوبين المنزوع الأكسجين تشكل عامل تشويش لدى دراسة باحات الدماغ المعنية بوظيفة معينة بطريقة BOLD (الفصل22).

- التجاوب المغنطيسي النووي NMR *Nuclear Magnetic Resonance* وهو أضعف بكثير، ولكن يمكن أن يظهر في كل الأوساط تقريباً، ضمن شروطٍ تشرحها الفقرة التالية.

نخلص مما سبق إلى ما يلي:

- إن الكثير من الذرات يبدي، بوجود حقل مغنطيسي $\vec{B}$، عزماً مغنطيسياً μ وهي حالة المغنطة الموافقة. ويرمز للمحصلة الجهرية لعزوم عدد كبير من الذرات بالرمز M.

- تظهر ضمن الشروط المألوفة المغنطة الموافقة النووية فقط ولو أنها ضعيفة جداً، وترجع إلى وجود عزم مغنطيسي ذاتي لكل مكون من مكونات النواة سواء كان بروتوناً أم نتروناً، ويأخذ اتجاهاً معيناً في الحقل $\vec{B}$.

- يرتبط العزم المغنطيسي العنصري μ ارتباطاً مباشراً بخاصة دورانية يطلق عليه اسم السبين وفق العلاقة: $\vec{\mu} = \gamma \vec{S}$

وهنا يتجلى مفهومان:

1) تتميز النوى، التي تملك سبيناً غير معدوم، بعزم مغنطيسي، يمكّنها من الاستجابة لحقل مغنطيسي معين. فنواة ذرة الهدروجين التي تضم بروتوناً واحداً تتميز بسبين وقدره $\frac{1}{2}$، في حين تتميز جميع النوى الأخرى التي تضم عدداً زوجياً من البروتونات وعدداً زوجياً من النترونات بسبين، معدوم ولا تصلح كعامل تباين في التجاوب المغنطيسي النووي، كما هو الحال في الكربون 12 الذي تتكون نواته من ستة بروتونات وستة نترونات على الرغم من سعة انتشاره وأهميته في علم الحياة. ولهذا يترتب علينا استخدام النظير 13 (الذي يتكون من ستة بروتونات وسبعة نترونات) والذي لا يمثل لسوء الحظ سوى 1% من الكربون الكلي. وكذلك فإن الأكسجين 16 لا يتجاوب هو الآخر (ولو أنه يتمتع بخاصة المغنطة الموافقة الإلكترونية التي تفيد في استخدامها كعامل تباين في تصوير التجاوب المغنطيسي).

2) تتميز كل نواة بثابت يطلق عليه اسم ثابت الجيرومغنطيسية gyro magnetic constant، ويعرف على النحو

$$\gamma = \frac{\mu}{J} = \frac{magneticmoment}{nuclearspin}$$

إذ يعبّر عن هذا الثابت بالوحدة *Hz/Tesla* أي بالهرتز على التسلا، وهما وحدتا التواتر وحقل التحريض المغنطيسي على التوالي. وهو اختيار يمكن أن ندركه جيداً من خلال علاقة التجاوب المغنطيسي الأساسية التي يتعامل معها العاملون في هذا المجال. ولكل نواة تواتر تجاوب خاص بها عند قيمة معينة للحقل المغنطيسي المطبق (الجدول21.1). (يجب عدم الالتباس بين J التي تدل على سبين النواة و J التي تدل على شعاع التمغنط)

الجدول21.1

النواة	العدد الكمي السبيني	عدد الحالات	تواتر التجاوب MHz عند 1.5 T
^{1}H	$\frac{1}{2}$	2	6.3866
^{2}H	1	3	0.9804
^{12}C	0		
^{13}C	$\frac{1}{2}$	2	1.6058
^{14}N	1	3	0.4614
^{15}N	$\frac{1}{2}$	2	0.6473
^{16}O	0		
^{17}O	$\frac{5}{2}$	6	0.8658
^{23}Na	$\frac{3}{2}$	4	1.6891
^{19}F	$\frac{1}{2}$	2	6.0079
^{31}P	$\frac{1}{2}$	2	2.5852

الفصل الثاني والعشرون

التجاوب المغنطيسي النووي والتصوير بالتجاوب المغنطيسي

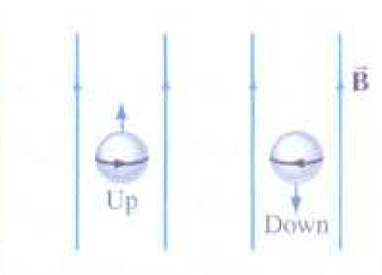
Nuclear Magnetic Resonance & Magnetic Resonance Imaging

التجاوب المغنطيسي النووي Nuclear magnetic resonance (NMR) ظاهرة سرعان ما أصبحت بعد اكتشافها في عام 1942 أداة بحث فعالة في العديد من المجالات من الفيزياء إلى الكيمياء والكيمياء الحيوية. وهي أيضاً تقنية مهمة في التصوير الطبي وفي التحليل والبحث العلمي. ندرس أولاً الظاهرة باختصار، ثم نتناول تطبيقاتها.

ترتبط ظاهرة الـ NMR بالخصائص المغنطيسية (العزم المغنطيسي النووي والحقل المغنطيسي) للنكليونات في داخل النوى (الفصل12)، في حين ترتبط ظاهرة التجاوب المغنطيسي الإلكتروني EMR بالخصائص المغنطيسية (العزم المغنطيسي الإلكتروني والحقل المغنطيسي) للإلكترونات في الذرات (الفصل2).

22.1. مبدأ التجاوب المغنطيسي والانزياح الكيميائي

تبدي النوى خصائص مغنطيسية تشبه الخصائص المغنطيسية لإلكترونات الذرة. وكما درسنا أبسط الذرات سوف ندرس أبسط النوى ألا وهي نواة الهدروجين، لأنها الأكثر استخداماً، حتى في التصوير الطبي. تتكون نواة الهدروجين ^1_1H من بروتون وحيد. لا يمكن لاندفاعه الزاوي السبيني، كما هو الحال لدى الإلكترون، أن يأخذ إلاّ قيمتين عندما يخضع إلى حقل مغنطيسي: نطلق على إحدى هاتين القيمتين السبين العلوي "spin up" (التوازي مع الحقل) وعلى القيمة الأخرى السبين السفلي "spin down" (حالة التوازي المضاد مع الحقل) على النحو المبين في الشكل22.1.



الشكل22.1. صورة تخطيطية لبروتون يخضع لحقل مغنطيسي $\vec{B}$ (يتجه نحو الأعلى)، بحالتيه السبينيتين الممكنتين العلوية والسفلية.

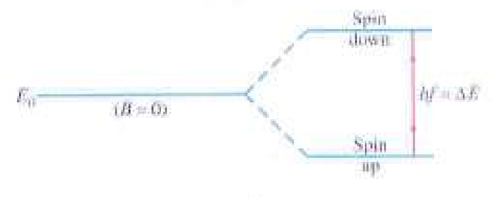
بتطبيق حقل مغنطيسي على النواة، تنشطر طاقة الحالة قبل تطبيق الحقل إلى مستويين على النحو المبين في الشكل22.2 إلى مستويين بحيث يأخذ سبينها المتجه نحو الأعلى (موازياً للحقل) الطاقة الأخفض (وهذا ما يشبه مفعول زيمان في حالة المستويات الذرية).

يتناسب فارق الطاقة ΔE بين المستويين طردياً مع الحقل المغنطيسي الكلي:

$$\Delta E = kB_T$$

حيث k ثابت التناسب الذي يختلف باختلاف النكليد. ومِنْ ثَمَّ يقابل هذا الفارق تواتراً معيناً كالعادة

22.1.1. الانزياح الكيميائي ومطيافية التجاوب الـNMR



الشكل22.2. إن طاقة النواة E_0 في غياب الحقل المغنطيسي تنشطر بوجود الحقل المغنطيسي إلى شطرين.

يستفاد من حدوث هذا الفارق في التجهيزات العيارية للتجاوب المغنطيسي النووي، فتوضع العينة التي يترتب دراستها في حقل مغنطيسي سكوني. ثم تطبق نبضة تواتر راديوي radiofrequency (RF) pulse من إشعاع كهرطيسي (أي فوتونات) على العينة. وإذا كان تواتر النبضة f يوافق تماماً فارق الطاقة بين مستويي الطاقة (الشكل22.2) بحيث إن:

$$hf = \Delta E = kB_T$$

فإن فوتونات حزمة التواتر سوف تمتص، مثيرة الكثير من النوى من الحالة الأخفض إلى الحالة الأعلى. تقع التواترات المقابلة للكثير من النوى في المجال الراديوي. تدعى هذه الظاهرة بظاهرة تجاوب يمكن التعرف عليها لأن الامتصاص لن يكون كبيراً إلاّ إذا كان f قريباً جداً من $f = kB_T / h$. ومن هنا جاءت تسمية التجاوب المغنطيسي النووي "nuclear magnetic resonance.". على سبيل المثال، يبلغ تواتر التجاوب $f = 42.58\text{ MHz}$ في حالة نوى الهدروجين ^1_1H الحرة، التي تخضع لحقل مغنطيسي شدته $B_T = 1.0T$. أما إذا كانت ذرات الهدروجين مرتبطة بجزيء، فإن الحقل المغنطيسي الكلي B_T عند نوى الهدروجين سيكون حاصل جمع كل من الحقل المغنطيسي الخارجي المطبق B_{ext} والحقل المغنطيسي الموضعي B_{local} العائد للإلكترونات ونوى الذرات المجاورة (يقصد في بعض الكتب الحقل المحلي مكان الحقل الكلي). ولما كان f يتناسب طردياً مع B_T، فإن قيمة f في حالة حقل خارجي معين ستختلف قليلاً في حالة ذرات الهدروجين المرتبطة عنها في حالة الذرات الحرة:

$$hf = k(B_{ext} + B_{local})$$

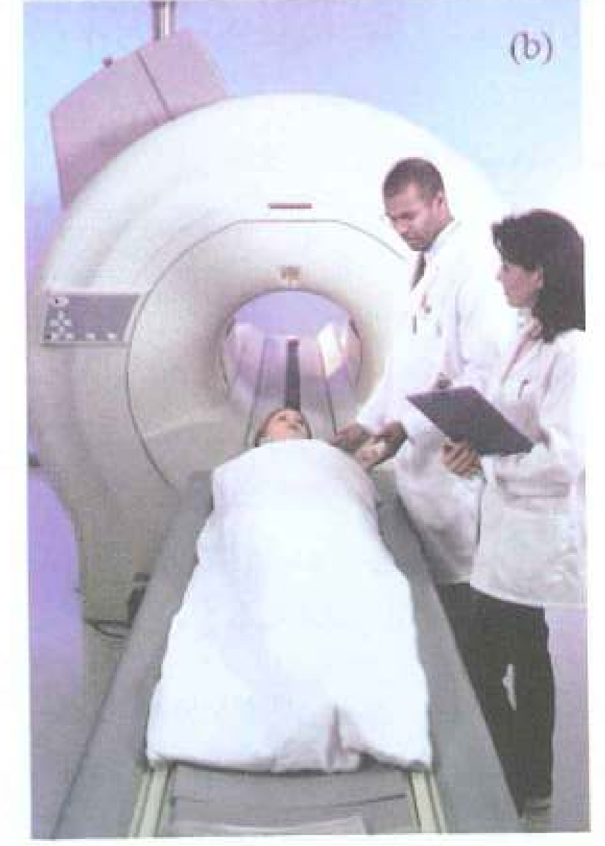
إن هذا التغير الصغير في التواتر الذي ينتج عن الجوار المباشر، يمكن قياسه ويدعى الانزياح الكيميائي"chemical shift"، وهو المبدأ الذي يعتمد عليه في مطيافية المستقلبات الحيوية التي يكشف عنها في الخزعات المقتطعة من الأورام ليتم التعرف على نوع الورم، وقد تم، باللجوء إلى قياسات التجاوب المغنطيسي النووي NMR، التعرف على بنيات الكثير من الجزيئات والروابط.

22.1.2. التصوير بالتجاوب المغنطيسي

وللحصول على صور NMR مفيدة طبياً تشيع تسميتها حالياً بتصوير التجاوب المغنطيسي MRI magnetic resonance imaging والعنصر الأكثر استخداماً لعزم نواته هو الهدروجين لأنه العنصر

الأكثر شيوعاً في الجسم ويصدر أقوى إشارات NMR. يظهر في الشكل 22.3 الجهاز المستعمل لهذا الغرض وأجزاؤه.





الشكل 22.3. تجهيزات تصوير التجاوب المغنطيسي النموذجية: (a) الشكل التخطيطي للملفات؛ (b) جهاز التصوير.

ينشأ الحقل المغنطيسي السكوني عن ملفات كبيرة، إضافة إلى ملفات تنشئ تدرجاً له، في حين تولد ملفات صغيرة نبضة التواتر الراديوي RF pulse من الأمواج الكهرطيسية (الفوتونات) التي تؤدي إلى قفز النوى من الحالة الأخفض إلى الحالة الأعلى(الشكل 22.3a). يمكن لهذه الملفات أو لملف آخر أن يكشف امتصاص الطاقة أو الإشعاع الصادر (وأيضاً تواتره $f = \Delta E / h$) عندما تقفز النوى من جديد نحو الحالة الأخفض.

يمكن تشكيل صورة ثنائية البعد أو ثلاثية البعد باستخدام تقنيات مماثلة للتصوير المقطعي المحوسب Computed Tomography. إن أبسط مقدار يمكن قياسه لبناء الصورة هو شدة الإشعاع الممتص أو الذي أعيد إصداره من مختلف نقاط الجسم الكثيرة، إذْ تكون هذه الشدة مقياساً لكثافة ذرات الهدروجين

H في كل نقطة. وتحدد النقطة من الجسم التي يأتي منها فوتون معين باستعمال تدرج معين للحقل المغنطيسي السكوني؛ أي يجعل الحقل المغنطيسي السكوني B_T متغيراً بدلالة الموقع ضمن عرض العينة (المريض) (الشكل22.4). وإذا كان التواتر الذي تمتصه نوى الهدروجين يتناسب طردياً مع B_T، فلن يمتص فوتونات تواتر معين f إلاّ المستوي من الجسم الذي يتميز بالقيمة المناسبة للحقل المغنطيسي الكلي B_T. بتغيير التواتر f يمكن قياس امتصاص المستويات المختلفة من الجسم. أو إذا تم تطبيق تطبيق تدرج حقل بعد نبضة التواتر الراديوي، يصبح تواتر الفوتونات الصادرة مقياساً للمكان التي صدرت عنه (الشكل22.4).

Patient

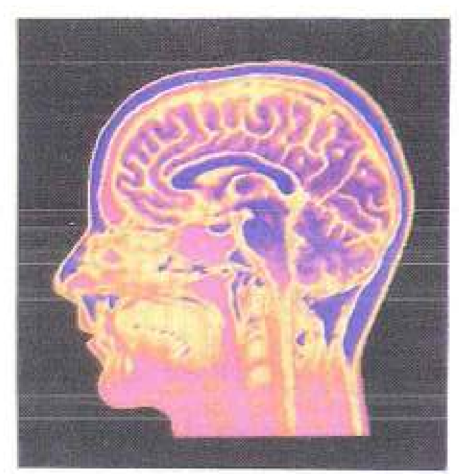
B low f low

B high f high

الشكل22.4. حقل مغنطيسي سكوني B (ثابت القيمة) في الأسفل أشدّ منه في الأعلى. يتناسب تواتر الإشعاع الممتص أو الصادر في NMR طردياً مع الحقلB.

عندما يطبق تدرج حقل مغنطيسي في أحد الاتجاهات أثناء الإثارة (امتصاص الفوتونات)، لا تثار إلاّ نوى الهدروجين في شريحة رقيقة واحدة. بتطبيق تدرج حقل مغنطيسي في اتجاه مختلف عمودي على الأول، في أثناء إعادة الإصدار، فإن تواتر الإشعاع f المعاد إصداره يمثل العمق في الشريحة، الملفات X و Y و Z في الشكل22.3a. يمكن استخدام طرائق أخرى لتغيير الحقل المغنطيسي في الجسم لربط تواتر التجاوب المغنطيسي بالموضع.

يمكن أن يعاد بناء الصورة اعتماداً على كثافة ذرات الهدروجين (أي شدة الاشعاع الممتص أو الصادر) ولو أن هذه الصورة غير مفيدة كثيراً لضعف التباين فيها. والصور الأكثر فائدة هي تلك الصور التي تعتمد على معدل استرخاء النوى إلى حالتها الأرضية، ويمكن لهذه الصور أن تحقق مقدرة فاصلة من مرتبة الملمتر أو أفضل.



الشكل22.5. صورة تجاوب مغنطيسي نووي بالألوان الاصطناعية لمقطع شاقولي في الرأس تظهر فيها نسج الدماغ السليم.

إن تقانة الـ NMR التي يطلق عليها أحياناً صدى السبين spin-echo تولد صوراً لها قيمة تشخيصية عالية، على صعيد وصف البنية التشريحية ودراسة العمليات الاستقلابية. يظهر في الشكل22.5 صورة NMR لمقطع شاقولي في الرأس.

يقابل امتصاص فوتون عملياً تغير في اتجاه سبين النواة، وإذا طبقت نبضة لتغير السبين في اتجاه معين سيعود هذا السبين بعد انتهاء النبضة إلى اتجاهه الأول بمعدل يعتمد تآثره مع السبينات المجاورة يعبر عنه بثابت استرخاء أول؛ كما يمكن أن يتآثر مع الأيونات المجاورة فتسهم في عودته بثابت استرخاء ثان. يمكن عند التحكم بالفواصل الزمنية بين النبضات وبمدد النبضات الوصول إلى مقدرة فاصلة زمنية تجعل تراكب نتائج النبضات المتعاقبة أعظمياً مشكّلاً صدىً واضحاً.

يعد تصوير التجاوب المغنطيسي مأموناً؛ لأن طاقة الفوتونات المعنية في حقل مغنطيسي $1.0\text{-}T$، $f = 42.58\text{ MHz}$ للهدروجين. الأمر الذي يقابل طاقة تساوي:

$$hf = (6.6\times10^{-34} J\cdot s)(43\times10^{6} Hz) \approx 3\times10^{-26} J$$

أي نحو $10^{-7} eV$. ولما كانت الروابط الجزيئية من مرتبة $1eV$، اتضح أن فوتونات التواتر الراديوي يمكن أن تسبب اضطراباً خلوياً ضئيلاً. الأمر الذي يجب مقارنته بالأشعة السينية أو أشعة غاما، التي تقدر طاقاتها من $10^{4} eV$ إلى $10^{6} eV$، ومِنْ ثَمَّ يمكن أن تسبب ضرراً كبيراً.

كما يعتقد أن الحقل المغنطيسي السكوني، على الرغم من كبره غير مؤذ، لكنه يجب الانتباه إلى ما يحمله المريض من غرسات أو مواد مغنطيسية، كالأشخاص الذين يحملون ناظمات قلبية heart pacemakers.

يتضمن الجدول 22.1 التقنيات التي ابتكرت مؤخراً لتصوير داخل الجسم، بالإضافة إلى المقدرة الفاصلة المثالية التي يمكن بلوغها حالياً. لا تمثل المقدرة الفاصلة طبعاً إلاّ أحد العوامل التي يجب أخذها في الحسبان؛ يجب تذكر أن تقنيات التصوير المختلفة توفر أنواعاً من المعلومات مختلفة، مفيدة لمختلف أنواع التشخيص.

الجدول 22.1. تقنيات التصوير والمقدرة الفاصلة

technique	المقدرة الفاصلة	التقنية
Conventional X-ray	0.5mm	الأشعة السينية التقليدية
CT scan, X-ray	0.5mm	التصوير المقطعي بالأشعة السينية
Nuclear medicine (tracers)	1cm	الطب النووي (القفاءات)
SPET (single photon emission)	1cm	التصوير المقطعي الإصداري الأحادي الفوتون
PET (positron emission)	3-5mm	التصوير المقطعي الإصداري البوزتروني
NMR	0.5-1mm	التجاوب المغنطيسي النووي
Ultrasound	2mm	الأمواج فوق الصوتية

22.2. تصوير التجاوب (الرنين) المغنطيسي الوظيفي

تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي Functional magnetic resonance imaging أو functional MRI (fMRI) طريقة تصوير وظيفي عصبوني تقيس فاعلية الدماغ بالكشف عن التغيرات الملازمة

لتدفق الدم نحو باحاته المختلفة، لاقترانها بالفاعلية العصبونية. فعندما تنشط باحة معينة في الدماغ، يزداد تدفق الدم إلى تلك الباحة أيضاً.

من أهم أشكال تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي ذلك الشكل الذي يعتمد على التباين في مستوى أكسجة الدم "بولد" Blood-oxygenation-level dependent (BOLD). وهو شكل يختص بوضع خرائط لفاعلية الدماغ العصبونية من خلال تصوير تغيرات تدفق الدم المرتبطة باستهلاك الطاقة في خلايا الدماغ. ثم برز تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي بالوسم السبيني الشرياني Arterial Spin Labeling وتصوير الانتشار بالتجاوب المغنطيسي Diffusion MRI.



الشكل22.6. باحث يتفقد الصور الوظيفية بالمرنان.

22.2.1. مبدأ تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي BOLD

تعتمد هذه الطريقة في التصوير على فارق المغنطة magnetization بين الهموغلوبين المؤكسج HbO2 المعاكس المغنطة diamagnetic والهموغلوبين المنزوع الأكسجينdHb الموافق المغنطة paramagnetic الذي يتصف بأن مغنطته أعلى منها في حالة الهموغلوبين المؤكسج. إذ يمكن تمثيل فاعلية الدماغ الناتجة بيانياً بترميز شدة الفاعلية فيه أو في المنطقة المدروسة منه، كما يمكن تحديد موقع الفاعلية بدقة نحو بضعة ملمترات ولو أن مقدرتها الفاصلة الزمنية ليست أفضل من بضع ثوان.

يطبَّق في هذه الطريقة حقل مغنطيسي سكوني شديد على منطقة الدماغ المدروسة لتوجيه نوى الهدروجين فيها. ثم يطبق حقل مغنطيسي آخر، تدرجي، لرفع النوى إلى مستويات للتمغنط أعلى تبعاً لمواقعها في الحقل التدرجي. وعندما يزال الحقل التدرجي تعود النوى إلى حالاتها الأصلية، وتقاس الطاقة التي تصدرها بملف يتصل بنظام لإعادة بناء مواقع النوى، يتوفر معه مشهد بنيوي سكوني لمادة الدماغ. غير أن اختلافات الخصائص المغنطيسية بين الدم الشرياني (الغني بالأكسجين) والدم الوريدي (الفقير

بالأكسجين) تسمح بإمكانية وضع خرائط لوظائف الدماغ. إذْ يؤدي فارق المغنطة إلى تحسين إشارة التجاوب المغنطيسي، ووضع خارطة واضحة تظهر فيها العصبونات الفعالة في اللحظة نفسها.

22.2.2. التصوير الوظيفي BOLD والفيزيولوجية

تحتاج العصبونات لدى إثارتها إلى ضخ إيونات عبر أغشيتها الخلوية كي تعود إلى حالتها الأصلية (المستقطبة). من شأن الدم المحمّل بالغلوكوز أن يزود هذه المضخات المحركة بالطاقة. وهو أمر يتحقق من خلال ارتفاع معدل تدفق الدم وتوسع الأوعية الدموية على السواء. يتوضع التغير في تدفق الدم ضمن 2mm أو 3mm في جوار الفاعلية العصبونية، إذْ يفوق الأكسجين المستقدم عادة الأكسجين المستهلك في حرق الغلوكوز مما يؤدي إلى انخفاض إجمالي في الهموغلوبين dHb في تلك الأوعية الدموية في باحات الدماغ. الأمر الذي يغير خاصة الدم المغنطيسية، ويخفض تدخله بالمغنطة المتحرضة واحتمال تفككها.

ترتبط المقدرة الفاصلة الزمنية لهذه الطريقة من التصوير الوظيفي بكل من الاستجابة الفيزيولوجية لتدفق الدم، وبمدى القدرة على قياس الفعالية العصبونية. من البرامترات الأساسية التي تتحكم في المقدرة الفاصلة الزمنية دور تكرار TR إثارة المغنطة في الدماغ، الذي يحدد عدد مرات إثارة شريحة معينة فيه وفقدانها مغنطتها في الثانية. يمكن أن تتغير أدوار التكرار TRs من 500 ms إلى 3s. تستغرق الاستجابة الهموديناميكية أكثر من 10 ثوان، إذْ تتضاعف الإشارة خلالها، وتمر بنهاية عظمى عند 4 إلى 6 ثوانٍ، ثم تهبط من جديد. من شأن التغيرات في جملة تدفق الدم، أي الجملة الوعائية، أن تكامل استجابات الفاعلية العصبونية مع الزمن.

22.2.3. التصوير الوظيفيBOLD والاستجابة الهموديناميكية

تترجم الاستجابة الهموديناميكية hemodynamic response (HDR) من خلال التغير في إشارة التجاوب المغنطيسي للفاعلية العصبونية، ولو أنها تتأخر عن الحوادث العصبونية التي تقدحها بثانية إلى ثانيتين لاستغراق الجملة الوعائية زمناً طويلاً في الاستجابة لحاجة الدماغ من الغلوكوز. ترتفع الإشارة في الحالة النموذجية إلى نهاية عظمى بعد نحو 5 ثوانٍ من التنبيه. فإذا استمرت العصبونات بالاضطرام، وليكن بتنبيه مستمر، تتخذ النهاية العظمى قيمة ثابتة مع بقاء العصبونات فعالة. عند توقف نشاط العصبونات تهبط إشارة BOLD إلى تحت مستواها الأصلي بقليل، ثم تعود مع الزمن إلى الخط الأساسي.

22.2.4. تصوير التجاوب الوظيفي BOLD والمقدرة الفاصلة المكانية

تعود المقدرة الفاصلة في هذه الطريقة من التصوير الوظيفي إلى مدى التمييز بين المواقع المتجاورة. وتقاس بأبعاد العناصر الحجمية (الفوكسيلاتvoxels)، إذْ يقدر حجم كل منها عموماً بنحو بضعة

ملمترات مكعبة. ويكون عدد العصبونات في العنصر الحجمي وتدفق الدم نحوه والإشارة التي تصدر منه أكبر بقدر ما يكون حجمه أكبر.

يمكن باستخدام حقول مغنطيسية سكونية قوية أو باستخدام تعاقبات من نبضات سبين إيكو spin-echo، التعرف على باحات برودمان والنوى تحت القشرية كالمذنبة والنواة العدسية والمهاد والحقول الجزئية الحصينية مثل اجتماع التلفيف المسنن CA3 وCA1 والمرقد الحصيني.

22.2.5. تصوير التجاوب الوظيفي BOLD والمقدرة الفاصلة الزمنية

إن المقدرة الفاصلة الزمنية في BOLD هي أصغر فترة زمنية يمكن تمييز الفاعلية العصبونية خلالها بموثوقية. من العناصر التي تتحكم فيها زمن التكرار TR. غير إنه في حالة TR أقل من ثانية أو ثانيتين، يولد المسح منحنيات استجابة هموديناميكية أكثر حدة من دون إضافة معلومات تزيد كثيراً على ما يعطيه TR أعلى. يمكن تحسين المقدرة الفاصلة الزمنية بتقديم تنبيهات تثير الدهشة أثناء التجارب. تعتمد مقدرة BOLD الفاصلة الزمنية أيضاً على زمن معالجة الدماغ لمختلف الحوادث. يمكن للتغيرات المكتسبة كالتعرف على الوجوه أو المشاهد أن تستمر أياماً أو شهوراً أو للأبد. تستغرق دراسة معظم تجارب BOLD للعمليات الدماغية التي تستمر بضع ثانيات، نحو بضع عشرات الدقائق. فعندما يحرك الأفراد الذين تجري عليهم الدراسة رؤوسهم خلال ذلك الزمن، فإن حركتهم تحتاج إلى تصحيح. كما يمكن للسأم والتعلم أن يعدل من سلوك الفرد وممارساته الاستعرافية.

22.2.6. تصوير التجاوب الوظيفي BOLD السريري

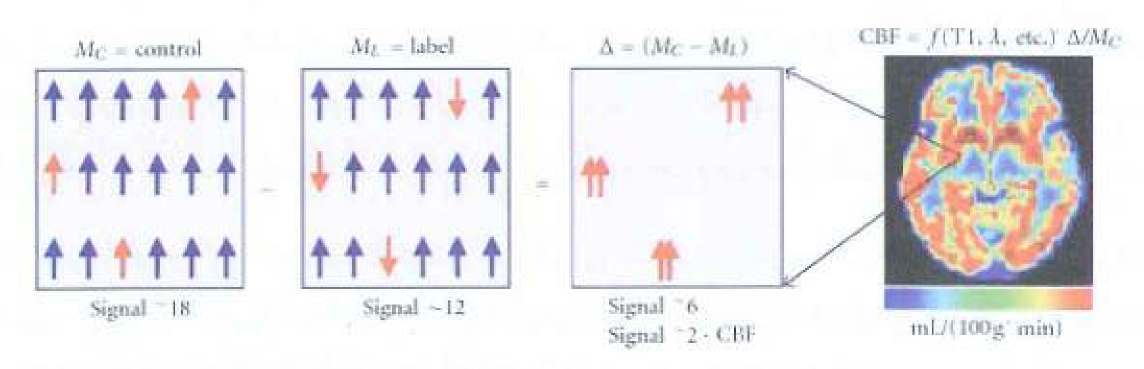
يستخدم الأطباء BOLD لتقييم مدى خطورة جراحة الدماغ أو المعالجة المماثلة اللاهجومية في حالة مريض وليعرفوا كيفية عمل دماغ طبيعي أو مريض أو مصاب. فهم يضعون خارطة للدماغ بهذه الطريقة للتعرف على الباحات المرتبطة بوظائف مهمة كالتكلم أو الحركة أو الحس ...إلخ. وهذا مفيد في التخطيط للجراحة ومعالجة الدماغ بالأشعة. يستخدم السريريون أيضاً BOLD ليضعوا خارطة تشريحية للدماغ والكشف عن الأورام والسكتة الدماغية وإصابة الدماغ والرأس أو الأمراض مثل الزهايمر.

22.2.7. تحليل بيانات التصوير الوظيفي BOLD

يهدف تحليل بيانات BOLD إلى الكشف عن العلاقة بين فاعلية الدماغ لدى شخص والمهمة التي يؤديها في أثناء المسح. كما يهدف أيضاً إلى الكشف عن العلاقة بين حالة استعرافية معينة لدى شخص والذاكرة والإدراك المتحرض لديه.

22.2.8. الوسم السبيني الشرياني والتصوير الوظيفي (الشكل22.7)

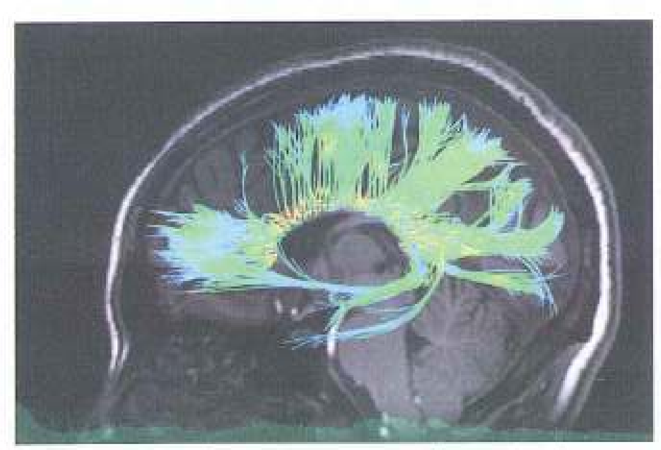
يهدف الوسم السبيني الشرياني Arterial Spin Labeling (ASL) إلى تصوير تروية النسج بوسم ماء الدم الشرياني مغنطيسياً قبل أن يصل إلى الشريحة المصورة ليؤدي دور عنصر تقفٍّ، داخلي المنشأ، لتدفق الدم ومن ثم قياس الكمية الصافية من عنصر التقفي التي تستهدف النسج. يتم الوسم بتغيير الحالة المغنطيسية للسبينات الواردة بإشباع مغنطتها أو قلبها. ومجرد وسم السبينات، وبعد مدة زمنية تسمح لها بالتبادل مع النسيج، يتم التقاط صورة تدعى الصورة الموسومة. يكون ماء الدم في هذه الصورة في حالة مغنطة مختلفة عنها في حالة ماء النسيج الساكن. فإذا قمنا بتمثيل النسيج الساكن بشعاع نحو الأعلى +1، فإن الماء الموسوم يكون إما 0 (حالة إشباع المغنطة) وإمّا 1− (انقلاب المغنطة). تمثل الإشارة في عنصر حجمي معين (فوكسيل) مجموع سبينات الدم والنسيج.



الشكل22.7. تمثيل تخطيطي لمراحل الحصول على إشارة ASL في عنصر حجمي. يمثل الشكل من اليسار إلى اليمين على الترتيب: إشارة عنصر حجمي من دون وسم M_C ، ثم إشارة العنصر الحجمي الموسوم M_L ، ثم الفارق بين الإشارتين $\Delta = (M_C - M_L)$ ، في حين تظهر إلى اليمين صورة تدفق الدم الدماغي.

للحصول على إشارة الدم الموسوم يتم التقاط صورة ثانية للنسيج من دون وسم شرياني مسبق تطرح من الصورة الأولى، إذْ تتناسب الصورة الحاصلة بالطرح طردياً مع تروية النسيج موضعياً.

22.2.9. تصوير تنسور الانتشار



الشكل22.8. ألياف المادة البيضاء في الدماغ.

تعتمد وظائف الدماغ على تلك الشبكة العنكبوتية المعقدة من المحاوير التي تربط بين باحات الدماغ، وتحمل الإشارات من عصبون إلى آخر. يوفر تصوير التجاوب المغنطيسي، بالإضافة إلى الكشف عن وظائف الدماغ، أيضاً أسلوباً لقياس هذه الوصلات التشريحية. تتكون المادة البيضاء في الدماغ من حزم من

هذه الألياف المحوارية، التي يكون لجميعها في منطقة صغيرة المنحى نفسه، يمكن بتصوير تنسور الانتشار Diffusion Tensor Imaging التعرف على منحى الألياف في كل نقطة من النقاط، وبذلك يسهل تعقب مساراتها ووضع خارطة لها. تعتمد هذه الطريقة في التصوير على حساسية إشارة التجاوب المغنطيسي للحركات العشوائية الصغيرة لجزيئات الماء. إذْ يمكن تشبيه انتشار جزيئات الماء بانتشار جزيئات قطرة من الحبر تتوسع ببطء في بركة من الماء. إذ يمكن وضع خارطة لتوجه الألياف بـ DTI لأن إزاحات جزيئات الماء العائدة للانتشار في مسارات ألياف المادة البيضاء، في اتجاه الألياف أكبر بكثير منها في حالة الاتجاه العمودي. إن هذه الطرائق تسهم في الكشف عن اضطرابات المادة البيضاء وتوصيفها في حالة المرض بالإضافة إلى وضع خارطة لمسارات أليافها.

22.2.10. تصوير التجاوب المغنطيسي البنيوي والتشريحي

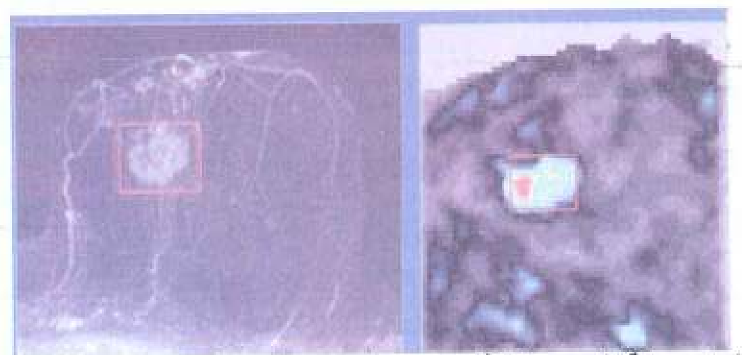
يوفر تصوير التجاوب المغنطيسي البنيوي معلومات حول تشريحية الدماغ التي تكمل تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي. أضف إلى ذلك أن تصوير التجاوب المغنطيسي البنيوي يوفر مرجعاً تشريحياً لإظهار نماذج التفعيل والباحات المعنية لاستخلاص معلومات الإشارات الوظيفية.

ربما يمكن، بالجمع بين تصوير التجاوب المغنطيسي البنيوي وتصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي وتصوير الانتشار، توصيف وظيفية الدماغ الطبيعية وغير الطبيعية بشكل أوسع، ودعم دراسات الوسم الحيوي في اضطرابات التحلل العصبوني أو النفسي لتحديد تقدم العلاج وفعاليته.

22.2.11. التجاوب المغنطيسي وتصوير المرونة

يزودنا الاستخدام الذكي للأمواج فوق الصوتية، كما رأينا (الفصل20)، ببطاقة لمرونة عضو معين في زمن قياسي، يقدر ببضع عشرات الميلي ثانيات. غير إن الأمواج فوق الصوتية لا تمثل الطريقة الوحيدة للاستكشاف. ثمة طريقة أخرى مهمة أبطأ بكثير تعتمد على التصوير بتصوير التجاوب المغنطيسي MRI. بيّن كل من Jim Greenleaf و Richard Ehman من العيادة Mayo في Rochestr في الولايات المتحدة و Ralph Sirkus عندما كان يعمل لدى Philips Medical systems في نهاية التسعينات أنه يمكن بالتجاوب المغنطيسي النووي قياس انزياح النسج في كل نقطة من عضو معين والمتولد نتيجة لاهتزازة جيبية. لم يعد يتعلق الأمر بإحداث موجة قص مقتضبة جداً تنتشر، ولكن يتعلق الأمر بنظام من الأمواج المستقرة الدورية عن طريق هزازة shaker تثار بشكل جيبي وتوضع على تماس مع الجسم البشري. يتحرك كل عنصر حجمي من النسيج في هذه الحالة بحركة جيبية يمكن تعيين كل من سعتها وطورها نقطة فنقطة بجهاز MRI معدل بشكل مناسب.

لنتذكر من دون الدخول في التفاصيل، أن التصوير بالتجاوب المغنطيسي يكمن في جس جزيئات الماء أو بالأحرى نوى ذرات الهدروجين في الماء الموجودة في النسج. تتفاعل سبينات نوى الهدروجين هذه (أو العزوم المغنطيسية) مع حقول مغنطيسية مناسبة يطبقها الجهاز. يتم إظهار المحتوى المائي للنسج بقياس هذه التفاعلات، التي تترجم بإصدار فوتونات. وبإضافة حقل أو عدة حقول مغنطيسية مهتزة بتواتر موجة القص الجيبية بالإضافة إلى مختلف الحقول المغنطيسية التي تستخدم عادة، يمكن بنوع من الستروبوسكوبية Stroboscopie، الدخول إلى ثلاث مركبات (واحدة لكل اتجاه) لانزياح كل منطقة صغيرة من النسيج المستكشف. وهي تقنية شديدة الحساسية: فهي تسمح بقياس انزياحات أقل من المكرومتر. وميزتها الرئيسية هي تزويد معلومات ثلاثية الأبعاد (في حجم معين من النسيج)، وتعيين ثلاث مركبات للإزاحة. إن هذه المعلومات أكثر غنى من المعلومات التي يزودها معظم أجهزة تصوير الصدى فوق الصوتي. وقد تم اختبار عدة أدوات في حالة الكشف عن أورام الثدي وجودة الصور الحاصلة في الجسم الكمي واعدة (الشكل22.5).



الشكل22.5. يمكن إظهار مرونة النسيج بتقنية تستعين بالتجاوب المغنطيسي. وقد تم الحصول على صورة بالألوان الاصطناعية لثدي مصاب بورم سرطاني بهذه التقنية (إلى اليمين). تدل الألوان على قيمة معامل المرونة (من صفر إلى 18 كيلوباسكال). ولدى مقارنتها بالصورة الحاصلة MRI (إلى اليسار) بمقدرة فاصلة عالية بالاستعانة بعوامل تباين، تحمل صورة المرونة للطبيب معلومات مكملة تسمح له بتدقيق تشخيصه.

إن تصوير المرونة بالتجاوب المغنطيسي النووي بالمقابل بطيء جداً، لأنه يجب تكرار عملية الستروبوسكوبي في حالة كل نقطة من نقاط الحجم (مكعبات صغيرة في الحقيقة ضلع كل منها 2mm). يحتاج الأمر عملياً إلى نحو عشر ثوان للحصول على صورة تقابل مستوياً مقطعياً ونحو خمس دقائق للحصول على صورة ثلاثية الأبعاد. إن البطء يعتبر معيقاً؛ لأنه يجب تجنب حركة الأعضاء في أثناء مدة اقتناء الصور.

خلافاً لتصوير المرونة العابر بالأمواج فوق الصوتية التي لا ترصد إلا أمواج القص البطيئة، فإننا نواجه المشكلة التالية: إن الأمواج الجيبية التي تولدها الهزازة باستمرار تنعكس عند السطح الداخلي لجسم المريض، وإن هذا الانعكاس يولد أمواج ضغط. يجب في هذه الحالة معالجة المعطيات لحذف جزء حقل الاهتزاز الذي يرافق الضغط، وهي عملية رياضية صعبة وتولد إشارات طفيلية.

إن الحصول على معلومات وفق ثلاثة أبعاد وعن مركبات إزاحة النسج الثلاثة يعطي ورقة رابحة مهمة: وهي القدرة على دفع تحليل مرونة النسج إلى أبعد من ذلك. فهو قادر على إظهار السلوك اللامتماثل المناحي للنسج، على سبيل المثال، سلوك عضلة معينة سلوكاً لا متماثل المناحي، لأن النسيج العضلي على طول الألياف أكثر قساوة منها وفق الاتجاه العرضاني. تتميز هذه الأوساط عملياً بعاملين للقص. إن الأهمية النسبية لهذين العاملين تعرف معامل لا تماثل المناحي الذي يعتمد على النسج. وهكذا فإن نسج الثدي الغدية متماثلة المناحي، إلّا في بعض الإصابات. يمكن لتصوير المرونة بالتجاوب المغنطيسي، أن يدخل إلى هذه اللاتماثلات في المناحي نظراً لطبيعته الثلاثية الأبعاد.

إن إظهار مرونة النسج الحية بدقة ملمترية، كما رأينا، أصبح حقيقة بالتصوير فوق الصوتي الفائق السرعة وبتقنية اختراق جدار الصوت القصية، كما أن التصوير بالتجاوب المغنطيسي واعد أيضاً. مع توافر أنماط الإثارة النبضية والجيبية، يمكن أيضاً بقياس لزوجة النسج، وهي خاصة تترجم بالزمن الذي يستغرقه نسيج معين لكي يتشوه لدى إخضاعه لإجهاد معين. تم الحصول مؤخراً على الصور الأولى للزوجة بالتقنية فوق الصوتية وبالتصوير بالتجاوب المغنطيسي. غير أنه يوجد اختلاف كبير في السعر والحجم بين هاتين الطريقتين لتصوير خصائص لزوجة – مرونة النسج، لصالح فوق الأصوات. إذا كان MRI يسمح اليوم بسوق معلومات ثلاثية الأبعاد، فإن تقنيات فوق الأصوات الجديدة في طريقها لإعطاء معلومات مماثلة، ولكن في نمط فائق السرعة وبمقدرة فاصلة مكانية أدق. وقد قام جاك سوكيه من فرنسا وهو شخصية عالمية في مجال فوق الأصوات مؤخراً بتصنيع نواة لجهاز جديد يدعى SuperSonic Imaging ، وتعهد بتصنيع هذا الجهاز الثوري للتصوير فوق الصوتي.

الفصل الثالث والعشرون

الناقلية الفائقة، منشؤها، وتطبيقاتها

Superconductivity, its Origin and Applications

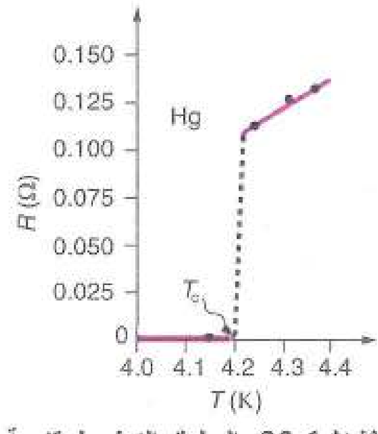
23.1. تمهيد

منذ اكتشاف الناقلية (الموصلية) الفائقة superconductivity في عام 1911، والتنبؤ بمفعول جوزفسون Josephson effect عام 1962 الخاص بعلاقة تيار الإلكترونات العابرة كمومياً بالتوتر في وصلة ناقلين فائقين (وصلة جوزفسون) التي صنعت عام 1963 في مختبرات بيل، واختبرت توقعات جوزفسون بنجاح، شهد العالم ظهور عدد كبير من تطبيقاتها الكمومية بدءاً من قياسات الحقول المغنطيسية الضعيفة ومعيار للتوترات الكهربائية وانتهاءً بالحواسب الكمومية العالية السرعة. وقد منح جوزفسون جائزة نوبل في الفيزياء عام 1973 بسببها. نذكر من هذه التطبيقات: **المغانط الفائقة** المستخدمة في توليد الحقول المغنطيسية الشديدة في تصوير التجاوب المغنطيسي (الفصل22) أحدث طرائق التصوير الطبية؛ وهي مغانط تتكون من ملفات دون نوى حديدية تعتمد على إمكان إمرار تيارات عالية جداً. و**السكويدات** SQUIDs (السكويد كلمة منحوتة من الحروف الأولى للعبارة Superconducting Quantum Interference Devices) التي تعني أدوات التداخل الكمومي الفائقة الناقلية، وهي أدوات لقياس الحقول المغنطيسية الضعيفة جداً التي فتح ابتكارها آفاقاً جديدة في علم القياس وفي الطب، إذْ أمكن زيادة دقة وحدة قياس الكمون (الفولط)، كما أمكن قياس الحقول المغنطيسية الضعيفة جداً التي ترافق ضربات القلب أو فاعليات الدماغ الكهربائية، والتي لا يتحسس بها أي مقياس آخر للمغنطيسية. إن هذه الحقول المغنطيسية أضعف من الحقل المغنطيسي الأرضي بمليون مرة على الأقل وقد كان يصعب قياسها من دون السكويدات مع أن بول وماكفي قد كشفا النقاب عن وجود حقول مغنطيسية للقلب عام 1963 أي قبل ميلاد السكويدات. وقد دعت نتائج الدراسات التي جرت باستخدام السكويدات إلى استكشاف تطبيقاتها البيولوجية، ولو أن تلك الدراسات لم تكن قد وصلت إلى حد يمكن من تقدير أهمية السكويدات في الفحوص الروتينية. ولفهم عملها والتمكن من تطبيقاتها لا بد من الرجوع إلى نظريات الناقلية الفائقة.

23.2. الناقلية الفائقة

تدل التجربة على تناقص مقاومة المعادن الكهربائية للتيار المستمر عموماً بانخفاض درجة الحرارة، ولكنها في حالة بعض المعادن تتناقص بانخفاض درجة الحرارة فجأة حتى تنعدم عند

بضع درجات كلفن، يظهر الشكل(23.1) أول قياس ظهرت فيه هذه الحادثة وكانت لمعدن الزئبق. دعي سلوك مثل هذه المعادن سلوك الحالة فائقة الناقلية، أو انعدام المقاومية الكهربائية. غير أنه اكتشف مفعول آخر لهذه المواد، إضافة لانعدام المقاومية الكهربائية، خاصة طرد هذه المواد، وهي في هذه الحالة، للحقول المغنطيسية الذي اكتشفه مايسنر Meisner وأوشن فيلد عام 1933 وأصبح يدعى مفعول مايسنر. فإذا وضع مغنطيس فوق مادة في حالة النقل الفائق فسيرتفع مبتعداً عنها (الشكل23.2). وتعدّ هاتان الظاهرتان مميّزتين لحالة الناقلية الفائقةSuperconductivity. وإن هذا الانتقال إلى حالة الناقلية الفائقة هو انتقال حاد ولكنه عكوسي؛ فإذا ما رفعنا درجة الحرارة إلى درجة أعلى من درجة التحول T_C، يعود المعدن ليصبح ناقلاً عادياً، ويبدي بعض المقاومة لدى إمرار التيار فيه.



الشكل23.1. السلوك الكيفي لمقاومة الناقل الفائق بدلالة درجة الحرارة.

تعاقب اكتشاف معادن متعددة تبدي هذا التحول، ولكن في درجات حرارة متفاوتة. وقد كان الرصاص والنيوبيوم من النواقل الفائقة التي استخدمت مدة طويلة، وهما متوافران في الطبيعة ونقطتا تحولهما على التوالي $7.2^\circ K$ و $9.5^\circ K$.



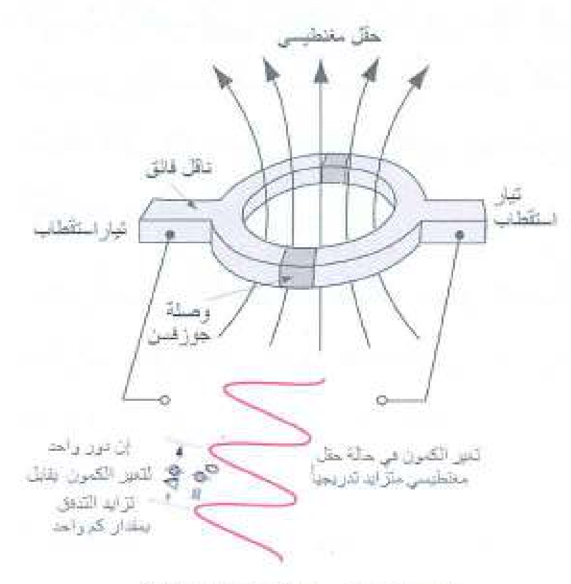
الشكل23.2. مفعول مايسنر

ظل تفسير ظاهرة الناقلية الفائقة غامضاً ردحاً طويلاً من الزمن، إلى أن رفع الحجاب عنها تدريجياً ليصل التفسير بنظرية متكاملة قبلها الفيزيائيون جميعهم قدمها الأمريكيون: باردين Bardeen وكوبر cooper وشرايفر Schrieffer في عام1957، أصبحت تدعى نظرية BCS اشتقت تسميتها من الحروف الأولى لأسمائهم . فأمكن تفسير خصائص النواقل الفائقة من خلال السلوك الخاص لإلكتروناتها وتشكيلها أزواج يتمتع كل إلكترونين، في حالة الناقلية الفائقة، وفقاً لهذه النظرية باندفاعين وعزمين سبينيين متعاكسين يرتبطان فيما بينهما برابطة ضعيفة تتوسطها اهتزازات الشبكة البلورية (الفونونات). فالإلكترونات، وهي جسيمات مشحونة سلبياً، تسعى إلى التدافع فيما بينها؛ ولكن ضمن ظروف خاصة يمكن أن يُبْدِيَنَ قوة جاذبة في حالة النقل الفائق تجعلها تتغلب على قوة التدافع. وينتقل هذان الإلكترونان المتزاوجان اللذان يسمّيان أزواج كوبر معاً. يمكن وصف هذه الأزواج، تبعاً لميكانيك الكم، بتابع موجي وحيد يمتد على طول الناقل. في الواقع من وجهة نظر كمومية إحصائية تنتقل معالجة الإلكترونات من معالجة فرميونات إلى معالجة بوزونات. وقد فسّر هذا النموذج النظري عدة ظواهر في فيزياء درجات الحرارة المنخفضة من وجهة نظر جديدة، كما سمح بتفسير كل الظواهر المتعلقة بالنواقل الفائقة المعروفة حتى ذلك الوقت. فقد لوحظ تجريبياً أنه عندما يرسل تيار في حلقة فائقة

الناقلية، فإن هذا التيار يستمر بالسريان إلى ما لا نهاية. وهذا يمكن تفسيره بالاعتماد على امتلاكها تابع موجي ممتد فلا تكبح الإلكترونات المتزاوجة التي تنتقل جميعها كما ينتقل جيش في حالة عرض عسكري. إذ إن اصطدام مجمل أزواج الإلكترونات بالشبكة البلورية للناقل الفائق يتطلب من هذه الأخيرة أن تصرف مقداراً من الطاقة يساوي على الأقل الطاقة الحركية للإلكترونات حتى تتمكن من إيقافها. ونظرية BCS لا تسمح بتفسير دوام تيارات الناقلية الفائقة فحسب، بل تفسّر كذلك أمر رجوع الناقل الفائق إلى الناقلية العادية بإمرار تيار أعلى من قيمة حرجة، أو إذا طبق عليه حقل مغنطيسي أعلى من حقل حرج مميز. إن هاتين القيمتين الخاصتين لكل من التيار والحقل المغنطيسي تقابلان الطاقة اللازمة لتحطيم أزواج الإلكترونات، وهذه الطاقة ذات طبيعة كهربائية في الحالة الأولى ومغنطيسية في الحالة الثانية، ويقترب الحقلان الحرجان اللذان يميّزان الرصاص والنيوبيوم من القيمتين 900gauss و 2,000gauss على التوالي. يمكن حالياً تصنيع مغانط فائقة الناقلية مكونة من خلائط النيوبيوم يمكنها أن تتحمل كثافات تدفق تزيد على 15Tesla (150kgauss)، غير أن الحقول الحرجة الفعلية اللازمة لتحويل السكويدات المصنوعة منها ضعيفة، كما سنرى.

23.3. الطابع الكمومي للتدفق المغنطيسي

يعتمد مبدأ السكويد على ظواهر أخرى ترتبط بالناقلية الفائقة، كتكمية التدفق المغنطيسي ومفعول جوزفسون. فإذا ما برّدت حلقة معدنية إلى درجة حرارة في مجال الناقلية الفائقة بوجود حقل مغنطيسي، ثم أوقف هذا الحقل، فإنه يلاحظ أن التدفق المغنطيسي (جداء الحقل داخل الحقل بالسطح) يظل محجوزاً فيها (الشكل23.3). فالتدفق في الواقع يحافظ على قيمته بفعل تيار الناقلية الفائق الذي يتولد في الحلقة - تبعاً لقانون لنز - لمعاكسة تغيرات التدفق ويقبع فيها بشكل دائم.

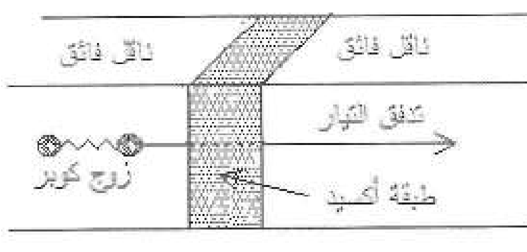


الشكل23.3. حلقة فائقة الناقلية.

إن هذا التدفق المغنطيسي، على غرار الطاقة الضوئية أو العزوم الزاويّة للجسيمات الذرية، هو ظاهرة كمومية: أي إنه لا تتغير قيمه باستمرار ولكن وفق قفزات صغيرة جداً. وبتعبير أدق: إن التدفق الكلي عبر حلقة فائقة الناقلية هو مضاعف صحيح لمقدار أساسي يدعى "كم التدفق المغنطيسي"، وهذا المقدار يساوي حاصل قسمة ثابت بلانك على ضعفي شحنة الإلكترون (نظراً لتزاوج الإلكترونات) أي: $h/2e = 2.05 \times 10^{-15} Weber$.

ولفهم ما تمثله هذه القيمة نتخيل حلقة قطرها يماثل قطر الشعرة، فإذا وضعت هذه الحلقة في الحقل المغنطيسي الأرضي فإنه يعبرها تدفق يقدر بنحو بضعة كمات. ولحسن الحظ ليس من الضروري استخدام حلقات بهذا الصغر للحصول على السكويدات. وقد دلت التجربة على أن سطحاً أكبر بكثير يسمح بكشف حقول أضعف بكثير من الحقل المغنطيسي الأرضي.

23.4. مفعول جوزفسون



الشكل23.4. وصلة جوزفسن.

تنبأ جوزفسون بمفعوله لدى دراسة وصلة ناقلين فائقين أحدهما مع الآخر، وكيفية سلوك أزواج كوبر عبر وصلة ناقلين فائقين يفصل أحدهما عن الآخر طبقة عازلة رقيقة من الأكسيد عموماً تقدر ثخانتها بنحو بضعة نانومترات(الشكل23.4). فأزواج الإلكترونات التي يجب أن تتوقف عند هذا الحاجز تبعاً للفيزياء التقليدية، يمكن أن تعبره بالمفعول النفقي. تتميز هذه الوصلة بخصائص تختلف عنها في حالة الناقلين الفائقين كل على حدة، فتيارها وحقلها المغنطيسي الحرجان بخاصة أضعف منهما في الناقلين الفائقين، وفي حالة قيم للتيار أضعف من تيارها الحرج تسلك سلوك ناقل فائق تماماً، فيختفي التوتر بين طرفيها، وعندما يسري فيها تيار أعلى من تيارها الحرج تصبح مقاومة، ويظهر توتر بين طرفيها.

يمكن تفسير هذا السلوك ضمن نطاق الوصف الموجي الذي أوردناه لأزواج الإلكترونات التي يتحكم بسلوكها تابع موجي وحيد: فإذا ما كان العازل الذي يفصل بين الناقلين الفائقين رقيقاً إلى حد كاف، يمكن للموجتين اللتين ترافقان سياقي الإلكترونات المتزاوجة إلى جانبي الوصلة أن تتداخلا، بشكل يؤثر في تصريف الإلكترونات بين الناقلين الفائقين. وفي الحالة التي يتساوى فيها تواترا الموجتين إلى جانبي الوصلة (في الناقلين الفائقين)، مع وجود فارق في الطور بينهما يحدث **مفعول جوزفسون المستمر**، ويعبر الوصلة تيار ضعيف من الإلكترونات الفائقة تتعلق شدته بفارق الطور بين الموجتين $I = I_g \sin\delta$، ويبلغ قيمة عظمى عندما يكون فارق الطور $90°$ وتصبح الوصلة عندها مقاومة. تفيد السرعة التي يجري الانتقال وفقها من الحالة الفائقة الناقلية إلى الحالة المقاومة، حالياً في بناء حواسب عالية السرعة.

يعالج أحياناً سلوك المادة في حالتها الفائقة على أنها مجموع تيارين أحدهما تيار فائق من الأزواج والآخر تيار عادي على التفرع معه.

لدى تتبع تيار الناقلية الفائقة عبر وصلة جوزفسون بدلالة التدفق المغنطيسي المطبق، يلاحظ أن هذا التيار ينعدم بشكل دوري، وهذا ما يذكرنا بظاهرة انعراج الضوء من خلال شق. وإن قيم التدفق التي تعدم

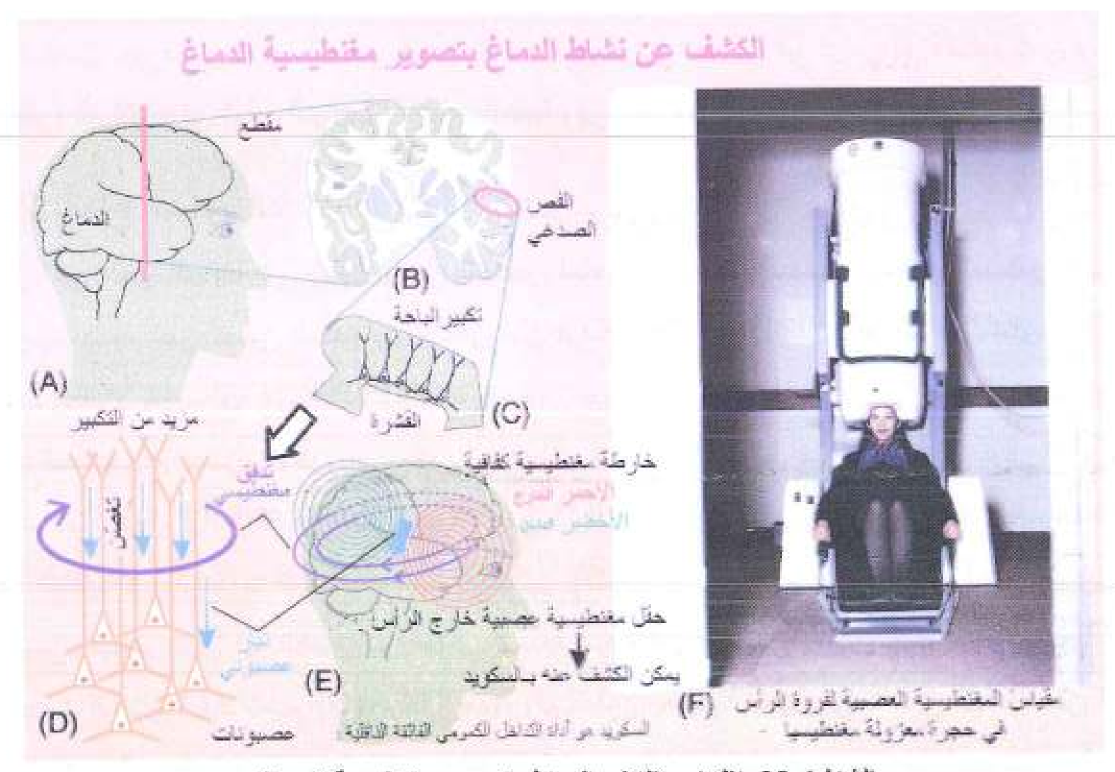
التيار هي مضاعفات صحيحة لكم التدفق. يمكن القول: إن وصلة جوزفسون في حلقة فائقة الناقلية تسلك سلوك الراعي الذي يفتح بوابة حقله ويغلقها بحيث يدخل منها خروف واحد في كل مرة، وهذا الخروف يقابل كم التدفق المغنطيسي.

ثمة مفعول جوزفسون آخر يطلق عليه اسم **مفعول جوزفسون المتناوب**. يحدث عندما يعبر الوصلة تيار أعلى من تيارها الحرج، غير أن التيار الذي ما يزال في هذه الحالة فائقاً، لم يعد مستمراً بل مهتزاً، يتناسب تواتره مع التوتر بين طرفي الوصلة ومعامل التناسب يساوي $484\ MHz/\mu V$ وبذلك يكون تواتر التيار من مرتبة بضعة جيغا هرتز في حالة توترات من مرتبة بضعة مكروفولتات، ومن ثم فإنه يقع في مجال التواترات العالية Hyperfrequency، وعليه يمكن استخدام وصلات جوزفسون ككواشف للأمواج الكهرطيسية. وهذا يفسّر حقيقة أنه يمكن لأزواج الإلكترونات أن تأخذ من الحقل الكهرطيسي قدر الطاقة التي يلزمها لعبور الوصلة دون أن تنفصل، فيعبر الوصلة حينئذٍ تيار الناقلية الفائقة في الحالة التي يتناسب فيها التوتر بين طرفي الوصلة مع مضاعفات تواتر الحقل المطبق ومع كم التدفق. ثمة تطبيقات أخرى لمفعول جوزفسون بالإضافة إلى قياس الحقل المغنطيسي، تتجلى في قياس كم التدفق الذي يستخدم في معايرة الفولتية وفي توليد التوافقيات harmonics وفي مضاعفة التواترات.

23.5. أنواع السكويدات

أشرنا في الفقرة السابقة إلى وجود نوعين مختلفين لمفعول جوزفسون وهما: المفعول المستمر والمفعول المتناوب. ينجم عن هذين المفعولين نوعان من السكويدات SQUIDs: المستمرة والمتناوبة. يتكون السكويد إجمالاً من حلقة فائقة الناقلية تضم وصلة جوزفسون واحدة أو وصلتين (تدعيان حاجزين) أو نقطتي الضعف أو جسرين مكروبين يمكن تحقيقها أو تحقيقهما بطرائق متعددة. يعطي تيار التحريض، في الحالات كلها، قياساً للتدفق الذي يعبرها ومِنْ ثمَّ للحقل المغنطيسي الذي نرغب قياسه. أما الحلقة الفائقة الناقلية في السكويد المستمر فتضم وصلتين (الشكل23.3) تصبحان مقاومتين لدى تطبيق حقل مغنطيسي، فيظهر فرق في الكمون بين طرفي الحلقة تسمح قيمته بتقدير التدفق المغنطيسي بسهولة. أما السكويدات المتناوبة فلا تضم إلاّ وصلة واحدة، ولهذا فإن تحقيقها أسهل. ولما كان الكشف عن انتقال وصلة واحدة إلى الحالة المقاومة أكثر صعوبة، قُرِنَت حلقة السكويد تحريضياً مع دارة خارجية مهتزة تحرض فيها تياراً متناوباً، تقع تواتراته بين عشرة ميغا هرتز (أمواج راديوية قصيرة) حتى التواترات العالية. وهكذا تترجم تغيرات التيار في الحلقة والمتحرض بفعل الحقل المغنطيسي الذي يطلب قياسه – بتغيرات في مستوى اهتزاز الدارة الخارجية التي يعرف قياسها.

كان الاعتماد مُدَّةً طويلة على قياس الكمونات بين نقاط مختلفة من أعضاء الجسم، ومنها قياس فعالية الدماغ ، نظراً لتوفر أدوات تقيس فروق كمون بالغة الصغر من مرتبة البيكوفولط ، ومِنْ ثَمَّ يمكن ربط ذلك بالتيارات الأيونية العصبية الداخلية. لكنه مع اكتشاف السكويدات و قانون فارادي توفرت طريقة أخرى للكشف عن التيارات في جسم الإنسان. إذ يمكننا، بالإضافة إلى قياس فروق الكمون بين نقاط على الجلد، أن نقيس الحقول المغنطيسية التي تولدها هذه التيارات. ونظراً لصغر التيارات، تكون الحقول المغنطيسية ضعيفة فتستخدم السكويدات في الكشف عنها. عندما تتغير التيارات، تحرض التغيرات في الحقل المغنطيسي قوى محركة متحرّضة في السكويدات. تقاس في المخطط المغنطيسي للدماغ magnetoencephalogram القوى المحركة المتحرضة في نقاط كثيرة بالقرب من الجمجمة مباشرة (الشكل23.4)، ثم يحسب الحاسوب موقع التيارات التي تصدر الحقل وقيمها واتجاهاتها في الدماغ. وبالمثل يكشف المخطط المغنطيسي للقلب magnetocardiogram عن التيارات الكهربائية في القلب والأعصاب المحيطة.



الشكل23.4. إظهار وظائف الدماغ بتصوير مغنطيسية الدماغ

تشغل قشرة دماغ الإنسان(A) سطح الدماغ كما يظهر في الشكل (B) . في القشرة عدد من التغصنات المرتبة بشكل متجانس، التي تتجه ناظمياً على سطح القشرة كما هو مبين في(C) و(D). تولد التيارات داخل الخلوية في هذه التغصنات حقولاً مغنطيسية يمكن كشفها خارج الرأس بالسكويد؛ يدل (E) على خارطة مغنطيسية تم توليدها بتيار عصبوني دقيق (تيار ثنائي قطب). يتوافر حالياً مقياس للمغنطيسية العصبية لكامل القشرة أو نظام سكويدي يغطي كامل الدماغ.

23.6. آلية قياس الحقول المغنطيسية الحيوية

عندما تتعرض العصبونات لتنبيه خارجي يترجم انفراغها الكهربائي بكمون كهربائي إجمالي تسمح مختلف التقانات بتحليله، ونذكر منها تقنية تصوير مغنطيسية الدماغ (MEG) التي تعتمد على قياس التغيرات الضعيفة للحقل المغنطيسي الصادر عن فعالية الدماغ الكهربائية، وهي من مرتبة جزء من مليون جزء من الحقل المغنطيسي الأرضي.

تسمح هذه التقنية بتعيين مواقع التفاعلات العصبية بمقدرة فاصلة مكانية تقدر بنحو (2mm) في مدّةٍ زمنية تقل عن جزء من ألف جزء من الثانية.

تجري هذه الدراسة بمقياس المغنطيسية العصبية (Neuromag-122) Neuromagnetometer الذي يتكون من العديد من السكويدات التي تمكن الباحثون بفضلها من قياس الحقول المغنطيسية الضعيفة التي يصدرها الدماغ، وتقصي التبدلات الدقيقة في فاعليته الكهربائية، وذلك بتتبع تلك الحقول كما تمكنوا أوّلَ مرة من تحديد موقع الاستجابة لتنبيه معين في قشرة الدماغ بدقة، من خلال قياسات خارجية.

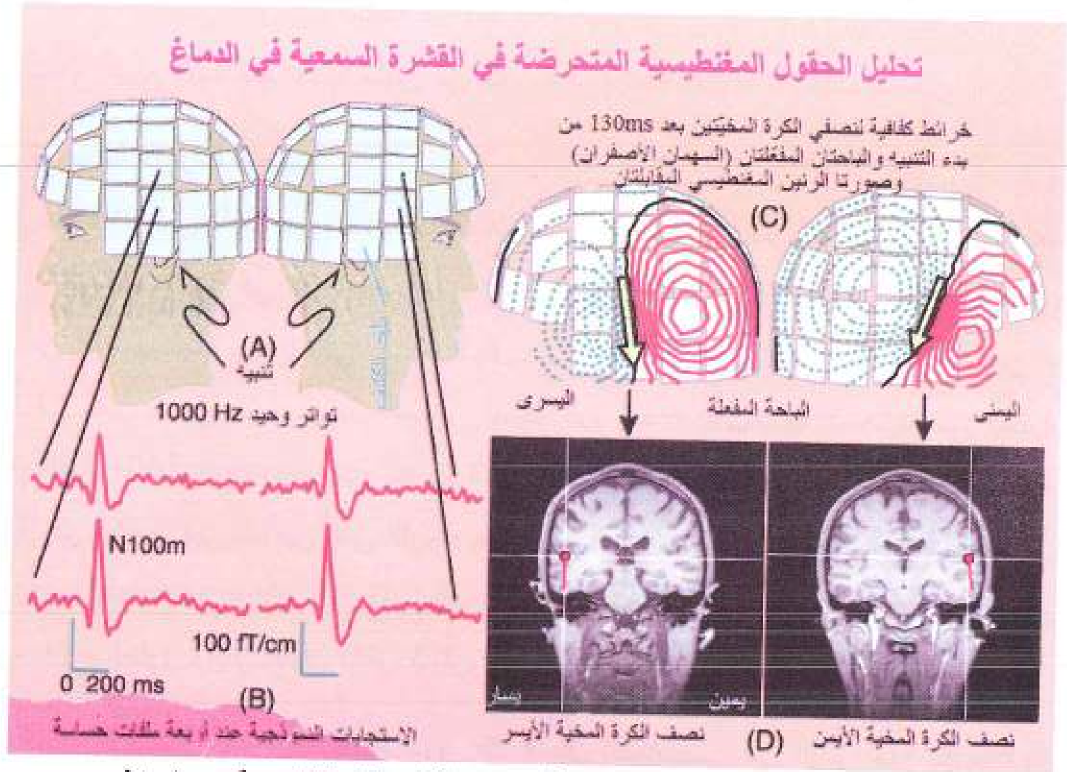
23.6.1. منشأ التيارات الحيوية

توجد في دماغ الإنسان، أكثر من عدة مئات الملايين من العصبونات التي تتصل فيما بينها، وتعمل على معالجة المعلومات. تسري في هذه العصبونات تيارات إيونية عندما تقوم بمعالجة المعلومات. يخرج التيار الإيوني من العصبونات، ويسري في الدماغ الناقل. يدعى التيار خارج الخلوي بالتيار الحجمي أو التيار الثانوي، في حين يدعى التيار داخل الخلوي الناجم عن الطاقة الكيميائية المختزنة في الخلية بالتيار السائد أو التيار الأولي. يتسرب التيار خارج الخلوي في الجمجمة الأقل ناقلية بكثير نحو فروة الرأس، مولداً فرقاً في الكمون بين نقطتين على الفروة، بما يعرف الكمون الكهربائي أي المخطط الكهربائي للدماغ أو (EEG electroencephalogram). ومِنْ ثَمَّ فإن المخطط الكهربائي للدماغ يعتمد على التيار المتسرب خارج الخلوي وليس التيار داخل الخلوي.

كما يولد تيار الإيونات حقلاً مغنطيسياً، يبرز هذا الحقل المغنطيسي من الرأس ماراً بالدماغ والجمجمة وفروة الرأس من دون أن يطرأ عليه أي تشوه، لأن النفاذية المغنطيسية لا تبدي أي اختلاف بين هذه النسج والهواء خارج الرأس. وعند فرض أن الدماغ هو النواة الكروية، وأن الجمجمة هي القشرة الكروية التي تغطي النواة الدماغية، وأن فروة الرأس هي القشرة الكروية الثانية التي تغطي القشرة الجمجمية؛ وأنه بالإضافة إلى ذلك أن الناقلية متجانسة في كل جزء (الدماغ والجمجمة وفروة الرأس). يمكن أن نستنتج بسهولة وفق قوانين الكهرباء والمغنطيسية المعروفة الحقائق التالية:

1. أن التيار الشعاعي السائد في الكرة (النواة أو القشرة) خارج الكرة أو القشرة لا يولد أي حقل مغنطيسي ناظمي على سطح الكرة.
2. التيار المماسي السائد في الكرة يولد حقولاً مغنطيسية ناظمية على السطح خارج الكرة أو القشرة.
3. إن التيار الحجمي في الكرة لا يسهم بالحقل المغنطيسي الناظمي على سطح الكرة خارج الكرة أو القشرة.

تتضمن الحقائق أعلاه أن الحقول المغنطيسية الناظمية على فروة الرأس تعتمد أساسياً على التيار داخل الخلوي السائد المماس لسطح الكرة. غير أنه في التحليل الدقيق، مع الأخذ في الحسبان عدم تحقق الشروط المفروضة، مثل أن يؤخذ التيار الحجمي أيضاً في الحسبان لأن قياس المركبة الناظمية الدقيقة للحقل المغنطيسي للدماغ صعب للغاية. وعلى كل حال تعكس الحقول المغنطيسية للدماغ بشدة التيارات داخل الخلوية.

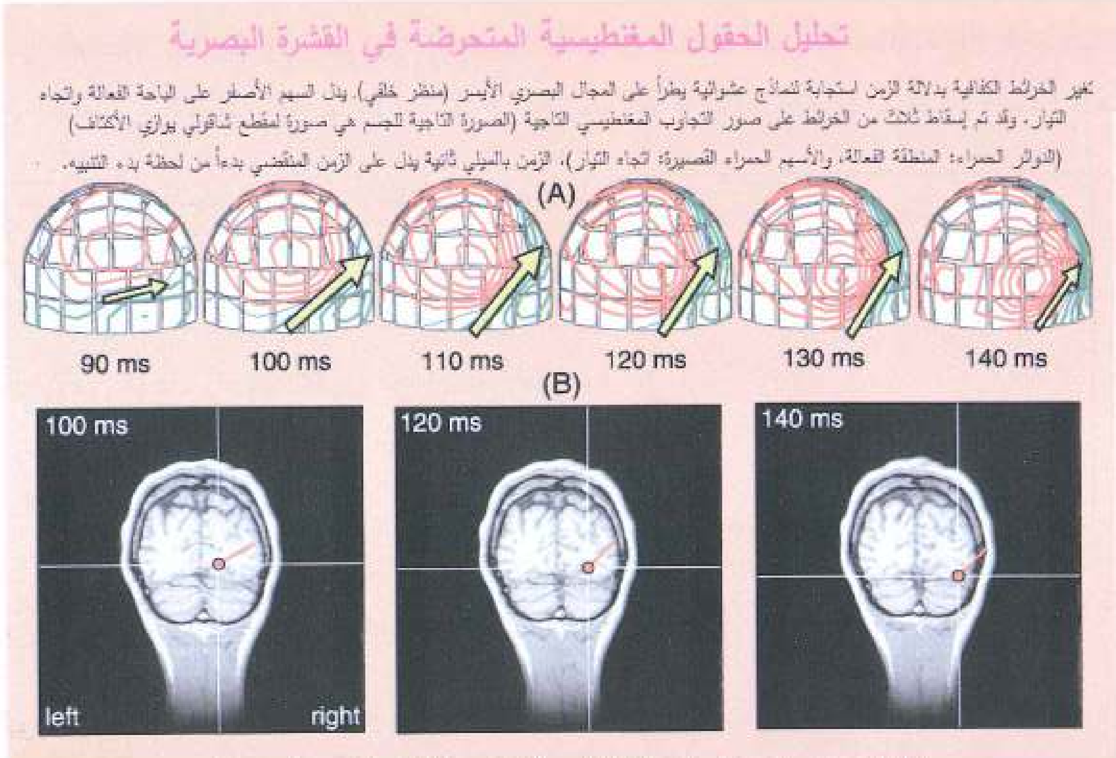


الشكل23.5. تحليل الحقول المغنطيسية المتحرضة في القشرة السمعية من الدماغ.

يظهر في A مثال عن بنية ملفية لمقياس المغنطيسية العصبية (Neuromagnetometer (Neuromag-122، إذ يدل المربع الأزرق على موقع الملف. تظهر في B صدور الموجة المغنطيسية استجابة لنغمة صافية مقتضبة تواترها 1000Hz، تبدي انحرافاً كبيراً بعد 100ms من انطلاق نغمة التنبيه. تظهر في C خرائط كفافية بعد 130ms على نصفي الكرة المخيتين الأيسر والأيمن. تتوضع ثنائيات الأقطاب الكهربائية في القشرة الصدغية المعروفة بالقشرة السمعية. تقدر المقدرة الفاصلة المكانية بنحو بضعة ملمترات.

إن استعمال تشكيلات مختلفة من السكويدات بأبعاد مختلفة ثم معالجة النتائج حاسوبياً يمكّن من الكشف عن باحات مختلفة في الدماغ وفعاليتها ومِنْ ثمّ تعيين أماكنها. على سبيل المثال، يظهر الشكل23.5 الترتيبات المستعملة لتعيين استجابة القشرة السمعية ونتائجها. وفي الشكل23.6 الترتيبات المستعملة لتعيين استجابة القشرة البصرية وتحديد فعاليتها.

إن الحقول المغنطيسية للدماغ ضعيفة للغاية، وهي تقدر من نحو 10^{-4} إلى نحو 10^{-9} من الحقل المغنطيسي الأرضي، إذْ لا يمكن الكشف عنها إلّا بالسكويدات. إلّا أن السكويدات الحالية لا تعمل إلّا في درجات حرارة منخفضة قرب الدرجة 270- درجة مئوية. لذلك يجري البحث باستمرار عن مواد فائقة الناقلية عند درجات حرارة عالية قدر الإمكان. كما أنه لا يمكن الكشف بهذه الأداة خارج الرأس عن الحقل المغنطيسي المتولد عن فاعلية عصبون واحد. غير أن الفعاليات لا تحدث عادة في عصبون واحد، بل في مجموعة من العصبونات، مما يجعل تسجيل الحقول المغنطيسية للدماغ ممكناً بطريقة غير هجومية خارج الرأس بنظام سكويدي حساس.



الشكل23.6. تحليل الحقول المغنطيسية المتحرضة في القشرة البصرية.

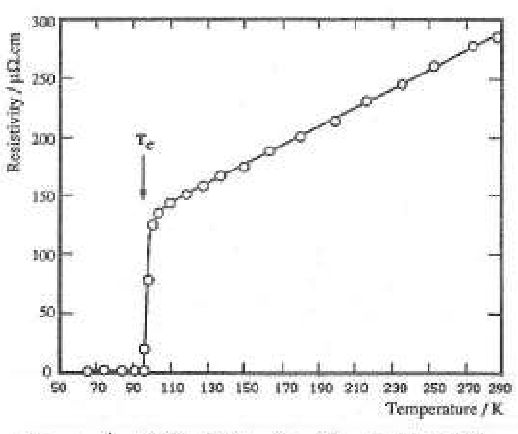
تظهر في A خرائط كفافية في القشرة البصرية استجابة لنموذج من الخطوط العشوائية، إذْ يخرج الحقل المغنطيسي من الرأس في منطقة الخطوط الحمراء، ويدخل في الرأس في منطقة الخطوط الخضراء. يقع ثنائي قطب التيار المكافئ في القشرة القذالية كما هو مبين في B إذْ تدل الدائرة الحمراء على موقع ثنائي القطب والخط القصير على اتجاه التيار. يمكن تحديد مواقع التغير في ثنائيات أقطاب التيار المكافئة كل ميلي ثانية.

تدعى طريقة قياس وتحليل الحقول المغنطيسية للدماغ "تصوير مغنطيسية الدماغ" (MEG) Magnetoencephalography، في حين تدعى البيانات المسجلة المخطط المغنطيسي للدماغ (MEG) Magnetoencephalogram. يمكن، بتحليل بيانات المخطط الكهربائي للدماغ المحرّضة مباشرة بتنبيه بصري أو سمعي أو كليهما، يتعرض له الفرد أو بمهمة استعرافية مناسبة أو كليهما، التعرف على باحات الدماغ المفعلة أو كيفية عمل الدماغ أو كليهما بدلالة الزمن بمقدرة فاصلة زمنية تقدر بميليثانية.

23.7. المواد الفائقة الناقلية العالية درجة الحرارة

فكر أونز، منذ اكتشافه للناقلية الفائقة، بالاعتماد عليها في توليد حقول مغنطيسية شديدة بملفات من دون نوى حديدية، وذلك للتخلص من عيوب هذه الأخيرة لما تتصف به من ثقل في الوزن ومن قدرتها المحدودة في الحصول على شدة عالية للحقل المغنطيسي للملف ولتوزعه المكاني.

غير أن أمله في الحصول على مغانط فائقة الناقلية قد خاب، لأن القصدير والرصاص فائقي الناقلية، لم يتمكنا من نقل تيارات كهربائية كبيرة كافية. وقد انقضى خمسون عاماً قبل أن يكتشف الباحثون أن خليطتي النيوبيوم – التيتانيوم والنيوبيوم– القصدير يمكن أن تتحملا التيارات المطلوبة. إلّا أنه يجب تبريد هاتين الخليطتين كالقصدير والرصاص، كذلك إلى الدرجة $4^{\circ}K$ بالهليوم السائل باهظ التكاليف، الأمر الذي حدَّ من تطبيقاتهما كثيراً. وإن اكتشاف كل من ملر *Müller* وبدنورز *Bednorz* للمواد الفائقة الناقلية الجديدة التي تعتمد على المواد البيروفسكاتية بصورة رئيسية، وهي مواد سراميكية تتكون من أكاسيد الإيتريوم والباريوم والنحاس وتبدي خاصة الناقلية الفائقة عند الدرجة $90^{\circ}K$، قد شجع العديد من فرقاء البحث على العمل في هذا المجال. ثم أعقب ذلك اكتشاف مجموعتين أخريين من أكاسيد النحاس، يدخل البزموت في إحداهما



الشكل23.7. مثال على النقل الفائق في درجات الحرارة العالية.

والتاليوم في الأخرى، تتمتعان بناقلية فائقة عند الدرجة $120^{\circ}K$. ونظراً لإمكانية تبريد هذه النواقل الفائقة العالية الحرارة إلى الدرجة $77^{\circ}K$ بالأزوت السائل الرخيص الثمن والمتوافر بكثرة فقد أعيد النظر في بعض تطبيقاتها التي كانت تعد سابقاً غير اقتصادية أو مستحيلة تقانياً. ولكن ما يزال يعترض عدداً من تطبيقاتها المتوقعة كالمولدات والمحركات وحفظ الطاقة والقطارات المحلقة المشاكل نفسها التي كانت تواجه أونز، إضافة إلى مشاكل ميكانيكية. والسعي حالياً لجعل هذه المواد الجديدة تجمع بين المتانة

والمرونة بحيث يسهل سحبها في أسلاك أو أشكال أخرى. كما يجري كذلك البحث في زيادة التيارات الكهربائية التي يمكن أن تتحملها لتوليد حقول مغنطيسية شديدة.

23.8. المغانط الفائقة

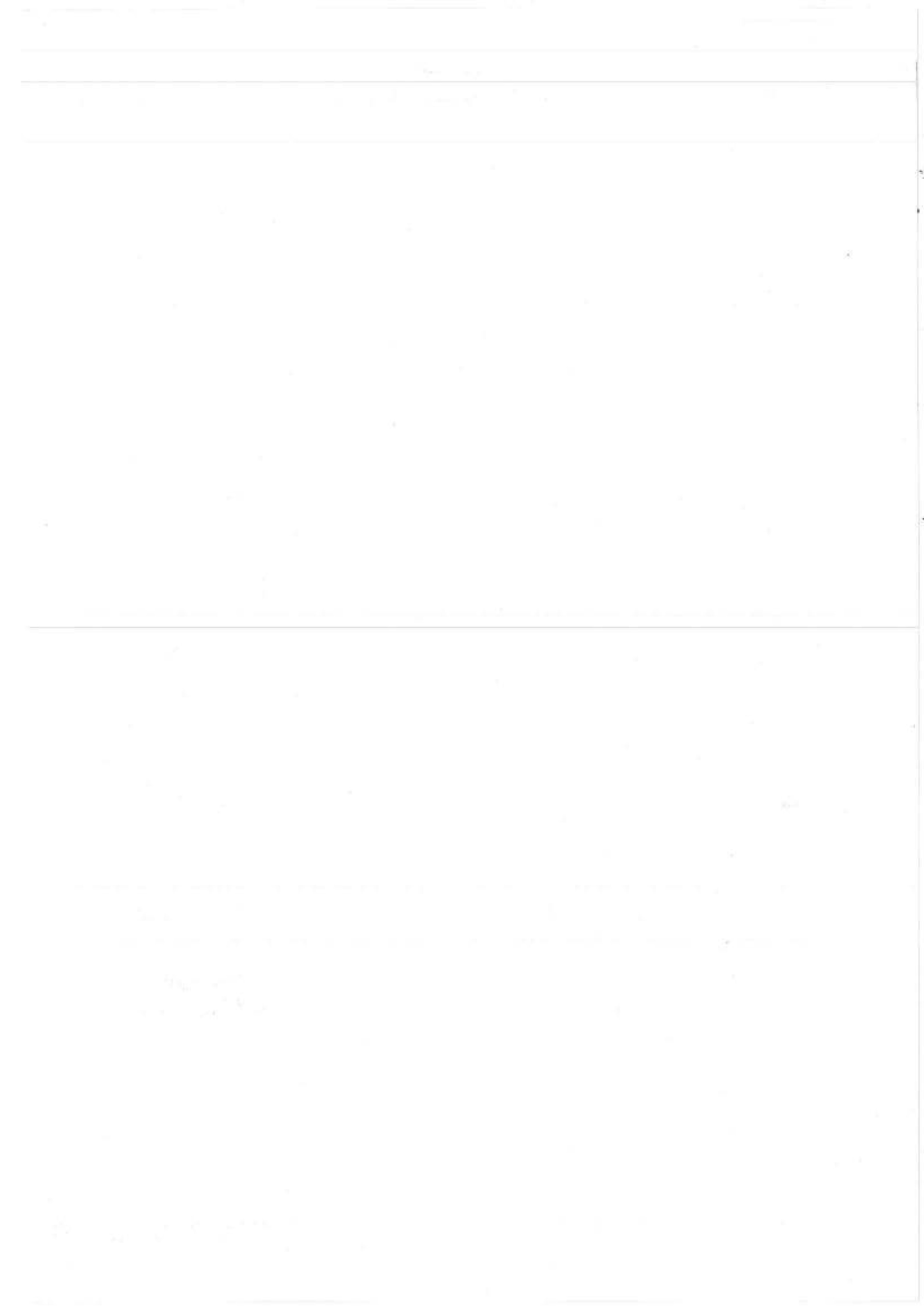
تستعمل المغانط الفائقة، كما ذكرنا، كأحدث وسيلة للتشخيص الطبي وهي تصوير التجاوب المغنطيسي النووي، إضافة إلى استعمالها في كل مولد ومحرك كهربائي. كما تستعمل في الصناعة لرفع المعدات الحديدية والفولاذية وفصل الشوائب عن مختلف المواد الأخرى.

إن معظم المغانط الكهربائية العادية تصنع بلف أسلاك نحاسية معزولة حول نواة حديدية، ويمر التيار الكهربائي في الملف محرضاً حقلاً مغنطيسياً يتجه وفق محور الملف. يمكن لسلك النحاس تحمّل تيار لا يزيد على $400\ Amper/cm^2$، وإذا حمّل السلك بتيار أكبر من ذلك تصبح كلفة التخلص من الحرارة الناتجة عن مقاومته الكهربائية غير اقتصادية. ومع أن النواة الحديدية تقوم بزيادة ذلك الحقل، ما يزيد شدته مئات بل آلاف المرات، فهو يغدو اقتصادياً لتوليد حقول تصل إلى $2Tesla$ فقط، أي أكبر بنحو 40,000 مرة من حقل الأرض. ولا يمكن الحصول على حقول أشد من ذلك نظراً لتشبع النواة الحديدية.

إن للمغانط الكهربائية ذات النوى الحديدية عيباً آخر: فهي ثقيلة، ذلك أن الحديد يشكل معظم وزن المحركات والمولدات الكهربائية.

وأمكن باستخدام النواقل الفائقة التوصل إلى مغانط أخف وأقوى. وفي أبسط التصاميم يمكن حذف النواة الحديدية وجعل الملف يحمل تياراً أضخم نسبياً. يمكن لخلائط النيوبيوم– التيتانيوم، والنيوبيوم – القصدير أن تحقق كثافة تيار $400,000\ Amper/cm^2$ ولكن عند الدرجة $4^\circ K$ فحسب. لقد جرى إعداد عينة ضخمة من أكسيد النحاس والإيتريوم والباريوم يمكنها حمل كثافة تيار شدته $400\ 0Amper/cm^2$ عند الدرجة $77^\circ K$ لحقل مغنطيسي شدته تسلا واحد. وفي غياب الحقل أمكن لهذه العينات أن تحمل تياراً شدته $17,000\ Amper/cm^2$.

تتأثر المغانط الفائقة بالشوائب تأثراً كبيراً، ويمكن أن تتأثر بالعيوب الميكانيكية التصنيعية، إذ تصبح هذه العيوب مراكز مقاومة ومراكز درجات حرارة عالية تفقد المغنطيس حالته الفائقة ويتخرب بسهولة. مع ذلك فقد انتشرت انتشاراً واسعاً ولاسيّما عندما أمكن عزلها حرارياً عزلاً جيداً مما خفض من استهلاك المبرّدات السائلة الهليوم والآزوت. كذلك يجب الانتباه إلى التدرج في رفع التيار الكهربائي الفائق الذي سيستمر لسنوات طالما أن السلك في حالة الناقلية الفائقة.



فهرس المصطلحات

Absorbance	الامتصاصية
Absorption	الامتصاص
Absorption spectra	طيوف الامتصاص
Absorption spectroscopy	مطيافية الامتصاص
accommodation	المطابقة (في العين)
Acousto-Optic imaging	التصوير الضوئي الصوتي
activate	يفعّل
Active region producing gain	منطقة فعالة مولدة للربح
Alexandrite lasers	ليزرات ألكسندريت
Amplitude A (imaging)	تصوير الصدى المطالي
Analysis	التحليل
Aperture	فتحة
Aphakia	اللاعدسيون، الأفراد الذين يفتقدون عدسة العين.
Arterial flutter and aneurysm	التضيق الشرياني والتوسع الشرياني
Arterial Spin Labeling	الوسم السبيني الشرياني
Arteriosclerosis	التصلب الشرياني
Atomic Dipole	ثنائي قطب ذري
Atomic mass unit	واحدة الكتل الذرية
Atomic number	العدد الذري
Atomic shell	الطبقة الذرية
Atomic sub-shell	الطبقة الذرية الجزئية (الفرعية)
Audible sound	الصوت المسموع
Audiometer	مقياس السمع
Balmer Series	سلسلة بالمر
Barometer	مقياس الضغط الجوي
Baryons	الباريونات
Beats	خفقات

Bioactive probe	مجس فعال حيوياً
Biochemical processes	عمليات كيمياحيوية
Biological tissue	نسيج حيوي
Bioelectromagnetics	الكهرطيسية الحيوية
Biopsy	الخزع
Black body	الجسم الأسود
Biostimulation	التحريض الحيوي
Blood	الدم
Blood-oxygenation-level dependent (BOLD)	الاعتماد على التباين في مستوى أكسجة الدم
Blood test	اختبار الدم
Brewster's angle	زاوية بروستر
Brilliance B (imaging)	تصوير الصدى وفق نمط السطوع
Brillouin scattering	انتشار بريلوان
Bronchial	القصبات الرئوية
Bulk modulus	معامل المرونة الحجمي، الجرمي
Calcium oxalate dihydrate	ثنائي هدرات حماضات الكالسيوم (الحصى)
Calcium oxalate monohydrate	أحادي هدرات حماضات الكالسيوم
Camera	المصورة
Carbonization	التفحم
Cataracts	السادّ (ات)
Cavitation bubble	فقاعة تكهف
Centrifuge	جهاز الطرد المركزي

Charge coupled device (CCD)

نبيطة اقتران الشحنة، وهي نبيطة نصف ناقلة، تعتمد على حركات الشحنات المختزنة بين مواقع محددة سلفاً، كما يحدث في تركيبات القرن بالشحنة.

Charge-coupled device (CCD) camera	مصوِّرة الأدوات المقترنة بالشحنة
Chemical shift	الانزياح الكيميائي
Chromatic scale	السلم اللوني (في الموسيقا)

Cladding	غلاف، غمد
Coagulation	التخثر
Compact, compactness,	متراصّ، تراصّ
Complex Molecules	الجزيئات المعقدة
Compression waves	أمواج انضغاطية
Compton Effect	مفعول كومتون
Computed Tomography	التصوير المقطعي المحوسب
Conduction	النقل
Cones	المخاريط
Continuity equation	معادلة الاستمرارية
Continuous wave (CW)	الموجة المستمرّة
Convection	الحمل (انتقال الحرارة)
Conventional X-ray	التصوير الشعاعي التقليدي
Core	القلب
Cornea	القرنية
Corona discharge	الانفراغ الهالي
Covalent bonds	الروابط المشتركة
CT scan, X- ray	التصوير المقطعي بالأشعة السينية
Cyto-toxicity of UV radiation	التسمم الخلوي بأشعة UV
Denature	يفسد (بروتينات)
Detection	الكشف
Diagnosis	تشخيص
Diamagnetic materials	مواد عكسية المغنطة
Diaphanoscopy	التصوير الشفوفي
Diastolic	ضغط انبساطي
Diatonic scale	السلم الدياتوني
Dielectric breakdown	تحطم (انهيار) كهرنفوذي
Diffraction	الانعراج

Diffraction Bragg's law	قانون براغ في الانعراج
Diffraction grating	شبكة الانعراج
Diffuse reflection	الانعكاس الانتشاري
Diffusion MRI	تصوير الانتشار بالتجاوب المغنطيسي
Diffusion Tensor Imaging	تصوير تنسور الانتشار
Diopter, diopters	الكسيرة، الكسيرات
Dipole Moment	عزم ثنائي قطب
Dispersion	التشتت
Disruption	تمزق
Dobson (DU)	الدُبسُن: واحدة تقيس تركيز الأوزون تعرف بأنها عدد جزيئات الأوزون اللازمة لتشكيل طبقة من الأوزون الصافي ثخانتها 0.01mm، في درجة حرارة الصفر المئوي، وفي ضغط جوي واحد؛ أو أنها تقابل ارتفاع عمود من الهواء مساحة مقطعه واحد سنتمتر مربع يحتوي على 2.69×10^{16} جزيء أوزون؛
Domains	مناطق (في المواد المغنطيسية)
Doppler shift	مفعول أو انزياح دوبلر
Double vision	الشفَع، ازدواجية الرؤية
Draw blood	سحب الدم
Dye molecules	جزيئات صباغية
Echography	تصوير الصدى أو الإيكوغرافي
Echoscopy	التنظير بالصدى
Elastic modulus	عامل المرونة
Electric Dipole	ثنائي قطب كهربائي
Electroencephalogram EEG	المخطط الكهربائي للدماغ
Elastically bound charged particles	جسيمات مشحونة مرنة الرابطة
Electrohydraulic	كهرهدروليكي (مولد أمواج صادمة)
Electromagnetic wave	الموجة الكهرطيسية
Electron microscope	المجهر الإلكتروني
Electron spin	سبين الإلكترون

Electronic Paramagnetic Resonance EPR	تجاوب المغنطة الموافقة الإلكترونية
Electrostatic attraction	التجاذب الكهراكدي
Emissivity	الإصدارية
Endoscope	منظار داخلي
Erythemal action spectrum	طيف الأثر الحُمامي
Exclusion principle	مبدأ الاستبعاد
Extracorporeal shock wave lithotripsy (ESWL)	تفتيت الحصى بالأمواج الصادمة من خارج الجسم
Extremely low frequency EL	تواتر منخفض للغاية
Far infrared	تحت الأحمر البعيد
Far point	نقطة المدى، أبعد نقطة عن العين يمكن لها أن تميز الأجسام فيها بدقة، وهي بالنسبة إلى العين السليمة تقع في اللانهاية.
Faraday's law	قانون فارادي
Farsighted eye	العين الطامسة، المديدة البصر (انظر hypermetropia)
Fermions	الفرميونات
Ferromagnetic materials	مواد حديدية المغنطة
Film exposition	تعريض الفلم
Fluorescence	فلورة
Fluorescent chromophores	حاملات لونية متفلورة
Fluorescent molecular probes	مجسات جزيئية متفلورة
Fluoroscopy	تنظير الفلورة
Focal plane arrays	صفائف مستوية البؤرة
Focus	بؤرة
Forced vibration	اهتزاز قسري
Fovea centralis	الحفرة المركزية
Frequency-domain optical imaging	التصوير الضوئي في نطاق التواتر
Functional magnetic resonance imaging	تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي

Functional MRI or fMRI	تصوير التجاوب المغنطيسي الوظيفي
Gauge pressure	الضغط القياسي
Gauss's law	قانون غاوس
Generation	توليد، جيل
Geometrical Optics	الضوء الهندسي
Gyro magnetic constant	ثابت الجيرومغنطيسية
Harmonics	توافقيات
Hearing threshold	عتبة الاستماع
Heart Pacemakers	ناظمات قلبية
Heat	الحرارة
Hemodynamic response (HDR)	الاستجابة الهموديناميكية
Hemoglobin(HbO2)	الهموغلوبين المؤكسج
High intensity focused ultrasound (HIFU)	الأمواج فوق الصوتية المبأرة العالية الشدة
Huygens's principle	مبدأ هويغنز
Hydrocephalic	تموّه الرأس
Hydronephrosis	استسقاء الكلية
Hydroxyapatite	مركب كيميائي من الفوسفات والكالسيوم يدخل بشكل رئيسي في تركيب مادة السن
Hyperfrequency	تواتر عالٍ جداً
Hypermetropia	**مد البصر، النظر=ops، قياس=metron، مابعد=Gr:hyper. عيب في الرؤية تتلاقى فيه الأشعة المتوازية الواردة إلى العين في محرق خلف الشبكية بدلاً من وقوعه عليها، ويصحح بعدسة مقربة**
Hyperopia	مد البصر
Hypersonic speed	السرعة فوق الصوتية
Hyperthermia therapy	المعالجة بالحرارة المفرطة
Imaging	التصوير
***in vivo* tracking**	التعقب أو التقفي في الجسم الحي
Incident radiation	إشعاع وارد
Inclusion	ضمينة (في النسيج)

Infrared Thermography	التصوير الحراري بالإشعاع تحت الأحمر
Infrared radiation	الإشعاع تحت الأحمر
Infrasonic, infrasound	الأمواج تحت الصوتية
Ingenious optical trapping systems	أنظمة أسر ضوئية متطوّرة
Inhalation	شهيق
Interference	التداخل
Interval	البعد (في الموسيقا)
Ionic bonds	الروابط الإيونية
Ionization	التأيين
Ionizing radiation	إشعاع مؤيِّن
Iris	القزحية
Irradiance	شدة الليزر، الاستطاعة السطحية
Isotropic	متماثل المناحي
Isotropic laser action	مفعول ليزري متماثل المناحي
Jet formation	تشكل نافورة (نفثة)
Laminar flow	جريان رقائقي
Laser lithotripsy	تفتيت الحصى بالليزر
Laser-induced lithotripsy of urinary calculi	تفتيت الحصى البولية المتحرض بالليزر
Lasing	الليزرة
Lasing threshold	عتبة الليزرة
Law of Malus	قانون مالوس
Lens fragmentation,	تشطيب العدسة
Lens-makers' Equation	معادلة صناع العدسات
Leptons	الليبتونات
Less-than-lethal weaponry	سلاح غير قاتل
Liquid mechanics	ميكانيك السوائل
Lithiasis	تشكل الحصى
Lithotripter, Lithotripsy	مفتت الحصى، تفتيت الحصى

Loudness	شدة الصوت أو علوّه
Low-divergence beam	حزمة منخفضة التباعد
Macula lutea	اللطخة الصفراء
Magnetic Dipole	ثنائي قطب مغنطيسي
Magnetic orbital quantum number	العدد الكمومي المداري المغنطيسي
Magnetic permeability	الإنفاذية المغنطيسية
Magnetic Resonance Imaging	التصوير بالتجاوب المغنطيسي
Magnetic Resonance guided Focused Ultrasound MRgFUS or MRgHIFU	الأمواج فوق الصوتية العالية الطاقة المبأرة والموجهة بالتجاوب المغنطيسي.
Magnetization	مغنطة، تمغنط
Magnetocardiogram	المخطط المغنطيسي للقلب
Magnetoencephalogram	المخطط المغنطيسي للدماغ
Magnetoencephalography	تصوير مغنطيسية الدماغ
Magnetron	مغنطرون
Manometer	مقياس ضغط زئبقي فرعي
Melanin	الميلانين
Melting	الانصهار
Metallic wave guide	دليل موجي معدني
Michelson interferometer	مقياس مايكلسون التداخلي
Microbeads	حبيبات (خرزات) مكروية
Microchip	رقاقة مكروية
Microwave diathermy	الانفاذ الحراري المكروموجي
Microwave Oven	الفرن المكروموجي
Microwaves	الأمواج المكروية (المكروويف)
Mid-infrared	منتصف تحت الأحمر
Millimeter waves	أمواج ملمترية
Miniaturization	نمنمة
Mitosis	انقسام الخليّة غير المباشر

Mode locking	قفل الأنماط (ليزر)
Modulated frequency	التواتر المكيف
Molecular spectroscopy	مطيافية جزيئية
Mold spores	أبواغ الفطور
Motor proteins	بروتينات محركة
Multiphoton uncaging	فك القفص بفوتونات متعددة
Multiple light scattering medium	وسط انتثار متعدد
Multiple plasma generation	توليد بلازمات متعددة
Multiple scattering	الانتثار المتعدد
Myopia	قصر البصر
Myopia حسر البصر، قصر البصر، عيب بصري في العين يتسبب في تشكل خيال الجسم الواقع في اللانهاية أمام الشبكية وليس عليها، يصحح بعدسة مبعدة.	
Nanobiosensor	حساس حيوي نانوي
Nanoprobe	مجس نانوي
Nanosensors	الحساسات النانوية
Near infrared (NIR)	المجال تحت الأحمر القريب
Near point	نقطة الكثب (العين)
Near point نقطة الكثَب، أقرب نقطة إلى العين، يمكن أن يشاهد منها جسم صغير بوضوح. غالباً ما يؤخذ بعد نقطة الكثب 25cm وهي الموافقة للعين السليمة.	
Near-field optics	بصريات المجال القريب
Nearsighted eye	العين الحسيرة
Neuromagnetometer	مقياس المغنطيسية العصبية
$NH_4MgPO_4 \cdot 6H_2O$	سداسي هدرات فسفات الأمونيوم والمغنزيوم
Nuclear Magnetic Resonance	التجاوب المغنطيسي النووي
Nuclear Medicine	الطب النووي
Optical microscopy	المجهرية الضوئية
Optical amplification	التضخيم الضوئي

Optical breakdown	تحطم (انهيار) ضوئي
Optical coherence tomography	التصوير المقطعي للترابط الضوئي
Optical nanobiosensors	حساسات نانوية بيولوجية ضوئية
Optical sensing modality	طريقة التحسس الضوئي
Optical trapping,"	الأسر الضوئي
Optical tweezers	الملقط الضوئي
Optical wavelength	طول موجة الضوء
Optical brighteners	المبيّضات الضوئية
Optometrist	المبصار
Optometrist	المبصاري
Orbital quantum number	العدد الكمومي المداري
Orthopedics	التجبير (تقويم الأعضاء)
Oscillating dipole	ذو قطبين كهربائي مهتز
Oscillation	الاهتزاز
Osteoporosis	هشاشة العظام
Overpressure	ضغط فائض
Paramagnetic materials	مواد موافقة (مسايرة) المغنطة
pathogens	الممرضات
Percutaneous nephrolithotomy	استخراج الحصى من الكلية بإحداث فتحة في الظهر ونسيج الكلية
Perform	يؤدي
Periodic table	الجدول الدوري
PET (positron emission tomography)	التصوير المقطعي الإصداري البوزتروني
Phacoemulsification	استحلاب العدسة
Phone	وحدة صوتية (السلم الشخصي)
Photo acoustic imaging	التصوير الفوتوصوتي
Photo acoustic shockwave	الموجة الصادمة الفوتوصوتية
Photoablation	الاستئصال الضوئي

Photochemical interactions	تفاعلات فوتوكيميائية
Photochemistry	الكيمياء الضوئية (الفوتونية)
Photodisruption	التمزق الضوئي
Photodynamic therapy (PDT)	المعالجة الفوتودينميكية
Photolyzed	متحلّل بالضوء
Phototherapy	المعالجة الضوئية
Photonics	الفوتونيات
Photosensitizer	متحسس ضوئي
Piezoelectricity	الكهرضغطية
Pinhole camera	المصورة ذات الثقب
Pitch	حدة الصوت أو طبقته
Plasma formation	تشكل البلازما
Plasma ionization	التأين بالبلازما
Plasma shielding effect	مفعول الحجب بالبلازما
Plasma sparking	شرارة بلازمية
Plasma-induced ablation	الاستئصال المتحرض بالبلازما
Polarizer	المقطب
Population inversion	الانقلاب الإسكاني
Posterior capsulotomy of the lens	خزع المحفظة الخلفية لعدسة العين
Potential phonon frequencies of the material	التواترات الممكنة لفونونات المادة
Power spectral density	كثافة الاستطاعة الطيفية
Principal quantum number	العدد الكمومي الرئيسي
Prism	موشور
Psoralens	الصدافولينات
Psoriasis	الصداف
Pulsed-dye laser	الليزر الصباغي النبضي
Pupil	بؤبؤ العين
Pyrimidine	أساس يدخل في تركيب الـ DNA

بإعادة تجميعها في المنبع مهما يكن تعقيد الوسط. لهذا السبب، يمثل انقلاب الزمن تقنية فعالة جد للتكيف مع تجميع الأمواج في الأوساط المعقدة. يمكن توليد هذه الموجة المتقاربة ثانية بمرايا انقلاب زمني Time Reversal Mirrors (TRM). يتم تحضير هذه المرايا من صفائف من الترجيب الكهرضغطية فوق الصوتية العكوسة التي يمكنها تسجيل حقل الموجة القادمة من المنابع وإعادة إرسال نموذج عنها في الوسط معكوس زمنياً. تعتمد هذه المرايا على الإلكترونيات المتعددة القنوات القابلة للبرمجة كلياً.

ثابت العزل الكهربائي للنسيج	is sue dielectric constant
الانعكاس الداخلي الكلي	o al Internal Reflection (TIR)
ترجام	r ansducer
نوبة نقص التروية العابرة	r nsient ischemic attack TIA
النفاذية	r nsmission
المجهر الإلكتروني بالنفوذ	r nsmission electron microscope
	r nsmittance
	r popause

التروبوبوز هي الطبقة الحدودية بين الستراتوسفير والتروبوسفير.

r posphere

تروبوسفير، أقرب طبقة جوية إلى سطح الأرض؛ يتغير ثخنها من نحو 8km عند القطب إلى 18km عند خط الاستواء، وفيها تتناقص درجة الحرارة مع ازدياد الارتفاع، وهي تحتوي على ثلاثة أرباع كتلة الجو الأرضي وكل بخار الماء تقريباً، وفيها تتشكل الغيوم، وتيارات الحمل النشيطة، طبقة الطقس.

اضطراب	u bulence
الامتصاص الثنائي الفوتون	w o-photon absorption (TPA)
التصوير الضوئي المقطعي المعدّل بالأمواج فوق الصوتية	lt rasonically modulated optical on ography
تصوير المرونة بالأمواج فوق الصوتية	lt rasound Elastography
وقف النزف بالأمواج فوق الصوتية	lt rasound hemostasis
الإشعاع فوق البنفسجي	lt raviolet radiation
روابط فاندرفالس	a der Waals bonds

Vaporization	التبخير
Vibrational absorption mode	نمط الامتصاص الاهتزازي
Vibrational energy levels	المستويات الطاقية الاهتزازية
Viscosity	اللزوجة
Viscous drag	مقاومة (جرّ) اللزوجة
Vitiligo	البهق
Vitreous fluid	المائع الزجاجي
Voxel	عنصر حجمي، عنصر في المقطع المصوَّر
Wave function	التابع الموجي
Wave Optics	الضوء الموجي
Waveguide	دليل موجي
Whirlpools	دوامات
Zeeman effect	مفعول زيمان

المراجع العلمية

أولاً: المراجع العربية

1. الفيزياء الطبية 1، منشورات جامعة دمشق، كلية الطب، 1996-1995، الدكتورة سهام الطرابيشي.
2. الفيزياء الطبية 2، منشورات جامعة دمشق، كلية الطب 1996-1995، الدكتورة سهام الطرابيشي.
3. الفيزياء الطبية، منشورات جامعة دمشق، كلية الطب2006-2005، الدكتورة سهام الطرابيشي.

ثانياً: المراجع الأجنبية

1- Physics for Scientists and Engineers, 9th edition, 2013, SERWAY & JEWETT, edited by Brooks/Cole.
2- Physics, 2nd edition, 2010, Alan Giambattista, Betty Richardson, Bob Richardson, edited by McGraw-Hill, Higher Education.
3- Laser-Tissue Interactions Fundamentals and Applications - Markolf H. Niemz, 3rd edition, 2002.
4- University Physics, 12th edition, 2008, Young & Freedman, edited by Pearson, Addison Wesley.
5- Physics , Principles with applications, 4th edition, 2009, Douglas C. Giancoli, Pearson Educational International.
6- Fundamentals of Physics, 9th edition, 2012, Haliday/ Resnick/ Walker, Wiley & Sons. Inc.
7- Comprendre l'imagerie de résonance magnétique, 5e édition, 2002, B. Castler & D. Vetter, Masson.
8- Imagerie cérébrale, fonctionnelle électrique et magnétique, 2004, Sous la direction de Bernard Renault, Lavoisier.
9- Essentials of radiologic science, 2001, Robert A. Fosbinder, Charles A. Kelsey, McGraw-Hill.
10- Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound, 1992, Peter Fish, Wiley & Sons.
11- The Physics of Vibrations and Waves, 5th edition, H.J. Pain, Wiley.
12- Biophysics, an introduction, 1992, Christian Sybesma, Kluer Academic Publishers.
13- Laser-Tissue Interactions Fundamentals and Applications - Markolf H. Niemz, 3rdedition , Enlarged Edition, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004, 2007
14- Electro-Optics Handbook 2e – Waynant, Ediger
15- Biomedical Photonics Handbook, Optical Properties of tissue chap2
16- Biomedical Photonics Handbook, Light – tissue interactions, chap3
17- Biomedical photonics, chapt05, Vladilen S. Letokhov, 2003 by CRC Press LLC
18- Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering





PHYSICS

For The Preparatory Year of Medical Colleges

Dr. Siham Tarabichi Dr. Baida Achkar Dr. Moustafa Sayem El-Daher

مطبعة جامعة دمشق

سعر المبيع : (١١٠٠) ل.س